



ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DA ADESÃO DE PREPREG'S COM DIFERENTES SUBSTRATOS

ADRIANO GOMES RODRIGUES

novembro de 2020

ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DA ADESÃO DE PREPREGS COM DIFERENTES SUBSTRATOS

Adriano Gomes Rodrigues

1141023

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DA ADESÃO DE PREPREGS COM DIFERENTES SUBSTRATOS

Adriano Gomes Rodrigues

1141023

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e coorientação do Dr. Paulo Jorge Roque De Oliveira Nóvoa.

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

Doutor Luís Miguel Pereira Durão

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Coorientador

Dr. Paulo Jorge Roque De Oliveira Nóvoa

Assistente convidado, ISEP

Arguente

Doutor José Luís Soares Esteves

Professor Auxiliar, FEUP

AGRADECIMENTOS

Gostava de expressar os mais sinceros agradecimentos, por toda a dedicação e empenho demonstrados ao longo desta etapa, ao Doutro Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e ao Engenheiro Paulo Jorge Roque De Oliveira Novoa.

Um agradecimento especial a toda a minha família, por todo o suporte dado, sem a qual a conclusão deste ciclo não seria possível. Por fim um agradecimento à minha namorada por toda a paciência.

PALAVRAS CHAVE

Método de elementos finitos, Modelos de dano coesivo, Análise de tensões, *Prepregs*, Juntas de sobreposição simples, Adesão, Método Inverso, Abaqus, Modelo coesivo triangular.

RESUMO

As soluções solicitadas pela indústria para ligação de componentes atualmente têm como principais requisitos fatores como resistência e custo. Esta problemática pode ser eficientemente resolvida com recurso a uma cuidada seleção de materiais, ramo que dentro da engenharia tem evoluído para corresponder aos requisitos do projeto. Deste processo surge a necessidade de analisar a adesão entre diferentes tipos de material compósito.

Esta dissertação analisa a adesão de juntas de sobreposição simples, com diferentes tipos de substrato (*prepreg* de fibra de vidro, *prepreg* de fibra de carbono e alumínio) e diferentes tipo de material adesivo (conjunto de uma camada de *prepreg* de fibra de vidro e duas camadas de *prepreg* de fibra de carbono, com orientações distintas para as fibras das camadas). O objetivo desta dissertação passa por descobrir a combinação, de diferentes substratos e materiais adesivos, que apresenta melhores propriedades mecânicas. Foram consideradas juntas com aderentes do mesmo material e juntas com aderentes de materiais distintos. As juntas foram obtidas num processo de uma ligação co-curada. Através da realização de ensaios de tração, que resultam num esforço maioritariamente de corte na ligação adesiva, foi possível determinar as propriedades da junta de sobreposição simples. Posteriormente procedeu-se à comparação das diferentes configurações de junta e, por fim, realizou-se um estudo numérico por modelos de dano coesivo (MDC) de análise do estado de tensão e previsão de resistência. Os modelos numéricos foram executados no *software* de simulação Abaqus®.

Com este trabalho foi possível concluir experimentalmente que o tipo de junta que apresenta melhor resistência à tração é a junta de substrato *prepreg* de carbono com o material adesivo *prepreg* de fibra de vidro com a fibras orientadas a $+45^\circ$ e -45° . Através da análise numérica, observou-se que a melhor resistência à tração foi obtida pelas juntas de substrato *prepreg* de carbono com o material adesivo *prepreg* de fibra de vidro e com a fibras orientadas a $+45^\circ$ e -45° .

KEYWORDS

Finite element method, Cohesive zone models, Stress analysis, Prepregs, Single-lap joints, Adhesion, Inverse method, Abaqus, Triangular cohesive model.

ABSTRACT

The currently requested solutions by the industry to join components have as main requirements factors such as strength and cost. This problem can be efficiently solved using a careful selection of materials, a branch that within engineering has evolved to match the design requirements. From this process arises the need to analyze the adhesion between different types of composite materials.

This thesis analyzes the adhesion of single-lap joints, with different types of adherend (glass fiber prepreg, carbon fiber prepreg and aluminum) and different types of adhesive material (set of one layer of fiberglass prepreg and two layers of carbon fiber prepreg, with different orientations for the fibers of the layers). The objective of this thesis is to discover the combination of different adherends and adhesive materials, which has better mechanical properties. Joints with adherends of the same material and joints with adherends of different materials were considered. The joints were obtained by a co-cured bonding process. By conducting tensile tests, which result in a predominant shear effort in the adhesive bond, it was possible to estimate the properties of the single-lap joint. Subsequently, the different joint configurations were compared and, finally, a numerical study was carried out using cohesive zone models (CZM) to analyze the stress state and carry out the strength prediction. The numerical models were performed using the Abaqus® simulation software.

With this work it was possible to experimentally conclude that the type of joint that presents higher tensile strength is the joint of carbon prepreg with the glass fiber prepreg adhesive materials with the fibers oriented to $+45^\circ$ and -45° . By the numerical analysis, it was found that the highest tensile strength was obtained by the joints of carbon prepreg adherends with the glass fiber prepreg adhesive material and with the fibers oriented to $+45^\circ$ and -45° .

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
AlF ₃	Fluoreto de alumínio
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CFRP	<i>Carbon fiber reinforced polymer</i>
CFM	<i>Chopped Fiber Mat</i>
CSM	<i>Chopped Stand Mat</i>
DCB	<i>Double-cantilever beam</i>
ENF	<i>End-notched flexure</i>
FRP	<i>Fiber reinforced polymer</i>
GFRP	<i>Glass fiber reinforced polymer</i>
IMC	<i>Injection molding compound</i>
JSS	Junta de sobreposição simples
MDC	Modelo de dano coesivo
MEF	Método de elementos finitos
MEFX	Método de elementos finitos estendido
RTM	<i>Resin Tranfer Molding</i>

Lista de Unidades

%	Porcentagem
g/cm ³	densidade
GPa	GigaPascal
J	Joule
kN	KiloNewton
m ²	Metro quadrado
min	Minuto
mm	Milímetro
MPa	MegaPascal
N	Newton
Pa.s	Viscosidade
s	Segundo
ton	Tonelada
°C	Graus celsius

Lista de Símbolos

B	Largura do provete
E	Módulo de elasticidade
F	Carga
G _I	Taxa de libertação de energia em modo I
G _{IC}	Taxa crítica de libertação de energia em modo I
G _{II}	Taxa de libertação de energia em modo II

G_{IIc}	Taxa crítica de libertação de energia em modo II
J	Taxa de libertação de energia
K_{COH}	Matriz que relaciona as tensões e deformações em corte e tração dos elementos coesivos
t_m^0	Tensão de máxima do modo misto
t_n^0	Tensão máxima de tração do modo puro
t_s^0	Tensão máxima de corte do modo puro
δ	Deslocamento
δ_n	Deslocamento em tração
δ_s	Deslocamento em corte
σ_f	Tensão de rotura
σ_Y	Tensão de arrancamento
σ_y	Tensão de cedência
ε_f	Deformação de rotura
ν	Coeficiente de poisson
τ_{avg}	Tensão média normalizada
τ_{xy}	Tensão de corte

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Aplicações de adesivos no AIRBUS A380 [2].	9
Figura 2 Aplicações adesivas na indústria aeroespacial [3].	9
Figura 3 Ligações adesivas em satélites [3].	10
Figura 4 Aplicações de adesivos na indústria automóvel [6].	10
Figura 5 Aplicações adesivas numa carruagem [7].	11
Figura 6 Ligações adesivas numa embarcação [8].	11
Figura 7 Reparação provisória temporária de um petroleiro com recurso a adesivos [9].	11
Figura 8 Esquema de aplicação adesiva na construção civil [10].	12
Figura 9 Esquema de aplicações de adesivos na indústria eletrónica [11].	12
Figura 10 Carregamento de tração e distribuição da tensão ao longo das juntas [adaptado de [1]].	14
Figura 11 Carregamento de compressão e distribuição da tensão ao longo das juntas [adaptado de [1]].	15
Figura 12 Carregamento de corte e distribuição da tensão ao longo das juntas [adaptado de [1]].	15
Figura 13 Carregamento de clivagem e distribuição da tensão ao longo das juntas [adaptado de [17]].	16
Figura 14 Carregamento de arrancamento e distribuição da tensão ao longo das juntas [adaptado de [17]].	16
Figura 15 Representação esquemática da rotura coesiva [adaptado de [19]].	17
Figura 16 Representação esquemática da rotura adesiva [adaptado de [19]].	17
Figura 17 Representação esquemática da rotura mista [adaptado de [19]].	18
Figura 18 Representação esquemática da rotura do substrato [19].	18
Figura 19 Representação esquemática de uma JSS [19].	18
Figura 20 Representação esquemática de juntas em T e de canto [14].	19
Figura 21 Representação esquemática de uma cobre-junta [1].	19
Figura 22 Representação esquemática de uma junta cilíndrica [1].	20
Figura 23 Representação esquemática de uma junta topo a topo [1].	20
Figura 24 Representação esquemática de ensaio DCB [47].	23
Figura 25 Representação esquemática de ensaio ENF [47].	23

Figura 26 Representação das tensões instaladas numa JSS: iniciação do dano no adesivo nas extremidades da área sobreposta (a) e crescimento do dano no alumínio aderente de alumínio (b) [73].	27
Figura 27 Tipos de matrizes, adaptado de [78].	30
Figura 28 Manta [74].	33
Figura 29 Diferentes tipos de orientação dos tecidos 2D [74].	33
Figura 30 Tecido 3D [74].	33
Figura 31 Aplicações de materiais compósitos na indústria aeronáutica[84].	37
Figura 32 Aplicações de materiais compósitos na indústria automóvel [85].	38
Figura 33 Representação esquemática de moldação por injeção [87].	39
Figura 34 Representação esquemática de moldação manual [88].	40
Figura 35 Representação esquemática da moldação por projeção [89].	41
Figura 36 Representação esquemática da moldação por compressão [89].	41
Figura 37 Representação esquemática da moldação por vácuo [89].	42
Figura 38 Representação esquemática do processo de enrolamento filamental [90].	42
Figura 39 Representação esquemática do processo de pultrusão [91].	43
Figura 40 Representação esquemática da moldação por centrifugação (adaptado de [92]).	43
Figura 41 Representação esquemática da moldação por RTM [93].	44
Figura 42 Representação esquemática de moldação em autoclave [94].	45
Figura 43 Representação esquemática da produção de prepreg [97].	46
Figura 44 Geometria dos provetes de JSS	58
Figura 45 Tratamento superficial de granalhagem	59
Figura 46 Limpeza dos substratos.	59
Figura 47 Posicionamento do material e dos substratos na prensa de pratos quentes.	60
Figura 48 Máquina de corte.	61
Figura 49 Remoção do material adesivo em excesso.	61
Figura 50 Corte de uma placa de GFRP em substratos de 15 mm de largura.	62
Figura 51 JSS com substrato de GFRP, com material adesivo CFRP orientado a 90°, a 0°, e GFRP com as fibras orientadas a +/-45°	63
Figura 52 Máquina de ensaio de tração SHIMADZU Autograph®.	63
Figura 53 Ensaio de tração	64

Figura 54	Curvas $P-\delta$ para as juntas de substrato GFRP, adesivo CFRP com orientação 0°	65
Figura 55	Curvas $P-\delta$ para as juntas de substrato GFRP, adesivo CFRP com orientação 90°	65
Figura 56	Curvas $P-\delta$ para as juntas de substrato GFRP, adesivo GFRP com orientação $\pm 45^\circ$	66
Figura 57	Curvas $P-\delta$ para as juntas de substrato CFRP, adesivo GFRP com orientação $\pm 45^\circ$	67
Figura 58	Curvas $P-\delta$ para as juntas de substrato CFRP, adesivo CFRP com orientação 90°	67
Figura 59	Curvas $P-\delta$ para as juntas de substrato alumínio, adesivo GFRP com orientação $\pm 45^\circ$	68
Figura 60	Curvas $P-\delta$ para as juntas de substrato alumínio, adesivo GFRP com orientação $0/90^\circ$	68
Figura 61	Curvas $P-\delta$ para as juntas de substrato alumínio, adesivo CFRP com orientação 0°	69
Figura 62	Curvas $P-\delta$ para as juntas de substrato alumínio, adesivo CFRP com orientação $\pm 45^\circ$	70
Figura 63	Curvas $P-\delta$ para as juntas de substrato alumínio, adesivo CFRP com orientação 90°	70
Figura 64	Resultados dos esforços de tração máxima experimentais	72
Figura 65	Desenho 2D no <i>software</i> ABAQUS®	74
Figura 66	Definição dos incrementos em análise	76
Figura 67	Pontos de encastramento e de tração	76
Figura 68	Diferentes tipos de malha nas várias regiões	79
Figura 69	Lei triangular do dano coesivo	80
Figura 70	Tensões de corte instaladas nas juntas com substrato de CFRP.	82
Figura 71	Tensões de corte instaladas nas juntas de alumínio.	83
Figura 72	Tensões de corte instaladas nas juntas de GFRP	83
Figura 73	Resumo das tensões de corte instaladas nas juntas	84
Figura 74	Tensões de arrancamento instaladas nas juntas de CFRP	84
Figura 75	Tensões de arrancamento instaladas nas juntas de alumínio.	85
Figura 76	Tensões de arrancamento instaladas nas juntas de GFRP.	85
Figura 77	Resumo das tensões de arrancamento nas juntas	86
Figura 78	Comparação entre curva $P-\delta$ SLJ_GG_C_00, numéricas	87
Figura 79	Comparação entre curva $P-\delta$ SLJ_GG_C90, numéricas	87
Figura 80	Comparação entre curva $P-\delta$ SLJ_GG_G_±45, numéricas	88
Figura 81	Comparação entre curva $P-\delta$ SLJ_CC_C90, numéricas.	88
Figura 82	Comparação entre curva $P-\delta$ SLJ_CC_G_±45, numéricas.	89
Figura 83	Comparação entre curva $P-\delta$ SLJ_AA_C_00, numéricas.	89

Figura 84 Comparação entre curva $P-\delta$ SLJ_AA_C_+/-45, numéricas	90
Figura 85 Comparação entre curva $P-\delta$ SLJ_AA_C_90, numéricas.	90
Figura 86 Comparação entre curva $P-\delta$ SLJ_AA_G_0/90, numéricas.	91
Figura 87 Comparação entre curva $P-\delta$ SLJ_AA_G_+/-45, numéricas.	91
Figura 88 Início da degradação da junta no <i>software</i> Abaqus®.	92
Figura 89 Simulação da rotura no <i>software</i> Abaqus®.	92

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Características das juntas adesivas [1].....	8
Tabela 2 Vantagens e desvantagens de materiais compósitos [76].....	28
Tabela 3 Tipos de fibras mais comuns na indústria dos compósitos [77].	29
Tabela 4 Tipos de reforço de materiais compósitos, adaptado de [1, 5, 8, 11]	29
Tabela 5 Características das matrizes [78].	31
Tabela 6 Propriedades de fibras de vidro [74].	34
Tabela 7 Propriedades da fibra de carbono[81, 82]	35
Tabela 8 Propriedades de matrizes poliméricas [74].	36
Tabela 9 Propriedades de matrizes cerâmicas [74].....	36
Tabela 10 Propriedades de matrizes metálica [74]	37
Tabela 11 Métodos de aplicação [77].	47
Tabela 12 Propriedades mecânicas do Al6082-T651 [120]	55
Tabela 13 Propriedades do <i>prepreg UD REM TAPE –12KT700 Carbon Fiber</i>	56
Tabela 14 Propriedades do <i>prepreg</i> de fibra de vidro E-761 <i>Epoxy prepreg 120 E-Glass</i> . [122].....	56
Tabela 15 Propriedades dos materiais adesivos	57
Tabela 16 Dimensões dos provetes	58
Tabela 17 Parâmetros de cura das juntas.	60
Tabela 18 Parâmetros de cura do substrato.	62
Tabela 19 Tipos de rotura.....	71
Tabela 20 Tipos de rotura nos ensaios.	72
Tabela 21 Tipos de material, comportamento e tipos de secção.....	75
Tabela 22 Tipos de malha e zonas onde foram atribuídas para determinar o comportamento das juntas à tração.	77
Tabela 23 Tipos de malha e zonas onde foram atribuídas para determinar as tensões de corte e arrancamento.	78
Tabela 24 Propriedades do adesivo obtidas pelo método inverso.	81
Tabela 25 Comparação experimental/numérica da resistência das juntas.....	93

Tabela 26 Resistência obtida pelo método numérico vs Tensões geradas nas juntas com substrato de alumínio.	95
Tabela 27 Resistência obtida pelo método numérico vs Tensões geradas nas juntas com substrato de CFRP.	95
Tabela 28 Resistência obtida pelo método numérico vs Tensões geradas nas juntas com substrato de GFRP.....	96

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos.....	3
1.3	Organização da dissertação	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	Ligações adesivas	7
2.1.1	Caraterização das ligações adesivas.....	7
2.1.2	Aplicações das juntas adesivas.....	8
2.1.3	Adesivos estruturais.....	12
2.1.4	Esforços e modos de rotura	14
2.1.5	Configurações possíveis de junta	18
2.2	Previsão de resistência de juntas adesivas	20
2.3	Métodos analíticos.....	20
2.4	Métodos numéricos.....	21
2.4.1	Mecânica da fratura.....	21
2.4.2	Modelo de dano coesivo.....	21
2.4.3	Mecânica do dano	25
2.4.4	Métodos dos Elementos Finitos Extendido.....	26
2.5	Materiais compósitos.....	27
2.5.1	Princípios fundamentais	28
2.5.2	Classes de materiais compósitos	31
2.5.3	Caraterísticas	34
2.5.4	Aplicações.....	37

2.5.5	Processos	38
2.5.6	<i>Prepregs</i>	45
2.5.7	Particularidades na ligação adesiva de materiais compósitos	46
2.6	Modificação de adesivos	48
2.6.1	Aditivação por partículas	48
2.6.1.1	<i>Partículas minerais</i>	48
2.6.1.2	<i>Partículas orgânicas</i>	49
2.6.2	Utilização de filmes de <i>preg</i>	50
2.6.3	Outros aditivos e compósitos modificados	50
3	DESENVOLVIMENTO	55
3.1	Trabalho experimental	55
3.1.1	Materiais utilizados	55
3.1.2	Aderentes	55
3.1.3	Materiais adesivos	57
3.1.4	Geometria das juntas	57
3.1.5	Processo de fabrico	58
3.1.5.1	Produção das juntas	59
3.1.5.2	Substrato de <i>preg</i>	62
3.1.6	Ensaio	63
3.1.7	Resultados obtidos	64
3.1.7.1	Curvas P- δ	64
3.1.7.2	Modos de rotura	71
3.1.7.3	Resistência das juntas	72
3.1.8	Análise de resultados	73
3.2	Trabalho numérico	74
3.2.1	Condições da análise numérica	74
3.2.2	Modelo de dano utilizado	79
3.2.3	Determinação das propriedades de dano	81

3.2.4	Análise de tensões na junta.....	82
3.2.5	Previsão do comportamento.....	86
3.2.5.1	Curvas P- δ	86
3.2.5.2	Modos de rotura	92
3.2.5.3	Resistência das juntas	93
3.2.6	Análise de resultados	94
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	99
4.1	CONCLUSÕES	99
4.2	PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS	100
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	103
6	ANEXOS.....	115
6.1	ANEXO1.....	115

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Sendo um ponto fundamental na engenharia, a seleção de materiais afeta características tão determinantes como o desempenho ou o preço final do componente. Como tal a evolução da engenharia ao longo dos tempos tem como principal objetivo a manipulação de materiais para que os mesmos preencham os requisitos impostos pelo projeto. Foi da necessidade de contornar esta problemática que os materiais compósitos surgiram. Os materiais compósitos têm como principal mais valia a capacidade de combinar as melhores propriedades de cada um dos seus constituintes. Características como a rigidez, resistência e peso específico são fatores preponderantes na sua escolha quando comparados com os demais materiais estruturais.

A engenharia tem um papel fundamental no desenvolvimento dos materiais compósitos, e a sua qualidade está intrinsecamente ligada à capacidade de adesão entre os constituintes do material compósito, assim é fundamental uma correta análise da adesão dos compósitos e existência de métodos numéricos fiáveis que possam prever o comportamento das suas ligações.

A utilização de *prepreg* como material adesivo tem o objetivo de estudar o seu comportamento à tração num cenário em que as fibras se encontram descontínuadas a fim de perceber qual o seu contributo neste novo contexto.

1.2 Objetivos

Com necessidade cada vez maior de unir diferentes tipos de material, tornou-se imprescindível o estudo dos diferentes tipos de ligação e encontrar novas soluções. Assim o objetivo desta dissertação passa por estudar a adesão substratos *prepreg* de fibra de carbono, substratos *prepreg* de fibra de vidro e substratos de alumínio, com material adesivo *prepreg* de fibra de carbono e *prepreg* de fibra de vidro. Para a realização deste estudo o método de ligação utilizado foi o co-curado. Inicialmente foram realizados ensaios experimentais com o objetivo de determinar qual a ligação que apresenta maior resistência à tração. De seguida, foram criados modelos numéricos representativos dos ensaios experimentais e efetuada a previsão de resistência por modelos de dano coesivo.

1.3 Organização da dissertação

A dissertação está dividida em quatro capítulos e a sua descrição é sumariamente apresentada em seguida.

O primeiro capítulo tem o título de Introdução, e o seu objetivo é enquadrar os princípios que deram origem a esta dissertação, apresentando os objetivos propostos a alcançar com a presente dissertação.

No segundo capítulo é realizada uma pesquisa bibliográfica, onde são expostos os conceitos teóricos com mais relevância para o desenvolvimento do tema abordado, sendo dada especial ênfase ao tipo de material adesivo abordado nesta dissertação.

O terceiro capítulo, denominado de Desenvolvimento, é abordado todo o trabalho desenvolvido. Este capítulo está dividido em duas partes. Na primeira parte são descritos todos os procedimentos realizados no trabalho experimental, tais como produção do substrato, tratamento superficial, produção da junta, entre outros, e de seguida são analisados os resultados obtidos experimentalmente. Na segunda parte é feita uma análise numérica recorrendo a modelos de dano coesivo. Inicialmente são determinados os dados necessários, procedendo-se depois à elaboração do modelo no *software* ABAQUS®. Por fim, neste capítulo são comparados e analisados os valores obtidos experimentalmente e os valores obtidos através dos modelos numéricos.

No quarto capítulo, denominado de Conclusões, é apresentada uma análise dos resultados obtidos ao longo da dissertação e são propostas sugestões de trabalhos tendo como base os resultados obtidos.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será realizada uma contextualização bibliográfica sobre todos os temas abordados no desenvolvimento desta dissertação. É dada especial ênfase à bibliografia que contempla os materiais termoendurecíveis, visto serem o alvo de estudo nesta dissertação.

2.1 Ligações adesivas

2.1.1 Caracterização das ligações adesivas

A ligação adesiva relativamente a outros processos de ligação apresenta vantagens como uma distribuição mais uniforme de tensões comparativamente com outros métodos de ligação, melhor resistência à fadiga, melhor capacidade de amortecer vibrações, redução global do peso da estrutura e a capacidade de ligar diferentes tipo de materiais bem como diferentes geometrias [1].

As principais desvantagens comparativamente a outros processos de ligação são a necessidade tratamento das superfícies a ligar, a sua capacidade de manter as propriedades mecânicas quando exposta a condições de serviço extremas, pouca resistência quando sujeito a esforços de clivagem e de arrancamento, inspeção da ligação muito complexa de ser realizada e a necessidade deste tipo de ligações recorrer pessoal especializado devido aos requisitos exigentes a sua aplicação [1]. Na Tabela 1 são resumidas as características das juntas adesivas.

Tabela 1 Características das juntas adesivas [1]

Juntas adesivas	
Tipo de ligações	Ligações geralmente permanentes.
Distribuição de tensões	Distribuição uniforme de tensões ao longo da largura da junta.
Geometria da união de junta	Sem alterações significativas da geometria da junta dos componentes ligados
União de materiais	Ideal para unir diferentes materiais.
Resistência à temperatura	Comportamento sensível a alterações de temperatura.
Resistência mecânica	Excelentes propriedades de fadiga, o isolamento elétrico reduz a corrosão.
Preparação da junta mecânica	Necessária uma limpeza cuidada.
Equipamentos	Custo elevado.
Tempo de produção	Minutos a horas, dependendo do tipo de junta.
Avaliação de qualidade	Métodos de avaliação não destrutivos limitados, exemplos inspeção visual, líquidos penetrantes, ultrasons.

2.1.2 Aplicações das juntas adesivas

Devido às suas propriedades, as aplicações de juntas adesivas abrangem atualmente as áreas mais distintas.

Na indústria aeronáutica as aplicações de adesivos são, regra geral, transferência de cargas, para esse tipo de aplicações os adesivos mais utilizados são os epóxidos, os acrílicos e os fenólicos, devido à sua capacidade de suportar cargas, de absorver vibrações, bem como a redução de peso da estrutura. Em geral são utilizados para unir portas, janelas e asas. Uma característica importante é o facto de alguns adesivos terem propriedades que retardam a chama [1]. Na Figura 1 são apresentadas algumas aplicações de adesivos na indústria aeronáutica.

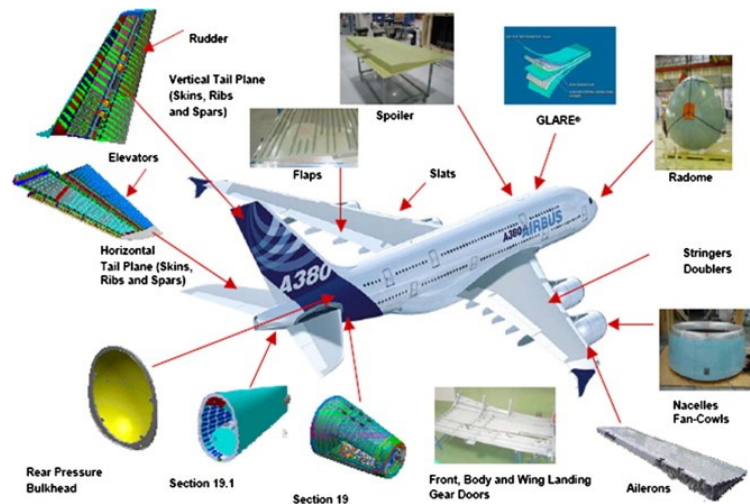


Figura 1 Aplicações de adesivos no AIRBUS A380 [2].

Uma outra característica de muitos adesivos é a sua capacidade de atuar como vedante e assim proteger as ligações dos efeitos da corrosão, uma vez que estão sujeitas a ambientes de humidade e temperatura extremas, bem como ambientes cuja sua composição química potencie a degradação rápida das ligações adesivas [1].

Na indústria aeroespacial a redução de peso é um aspeto fundamental na otimização de componentes e como tal, a utilização de adesivos tem cada vez mais um papel preponderante [3]. A sua capacidade de reduzir o peso global da estrutura favorece a sua utilização como elemento de ligação na construção de estruturas *sandwich* com núcleos do tipo *honeycomb*. Na Figura 2 são apresentadas algumas aplicações de adesivos na indústria aeroespacial.

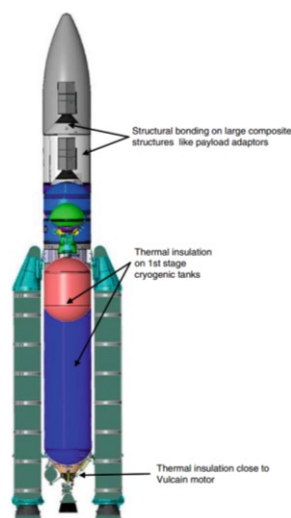


Figura 2 Aplicações adesivas na indústria aeroespacial [3].

Outra situação em que são utilizados adesivos é para unir partes dos satélites devido à sua capacidade de absorver deformações dos diferentes materiais, visto que um dos principais problemas se prende com a elevada amplitude térmica a que estão sujeitos,

sendo assim também utilizados para unir os painéis solares, bem como o revestimento da estrutura de armazenamento de *hardware* [4]. Na Figura 3 apresentam-se aplicações de adesivos em satélites.

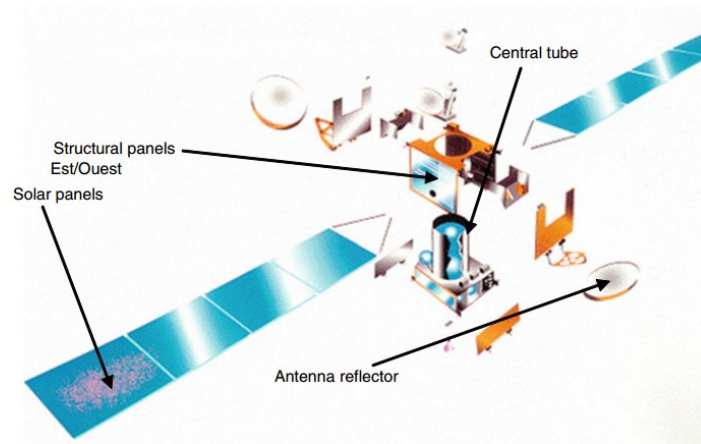


Figura 3 Ligações adesivas em satélites [3].

Na indústria automóvel a ligação de componentes recorrendo a adesivos está amplamente implementada. Inicialmente as ligações adesivas foram usadas para fixar vidros, plásticos e vedantes [5], e mais recentemente com o aparecimento de uma nova geração de adesivos foi possível recorrer à sua utilização para ligar componentes estruturais como flanges, portas, tejadilho, e portas da mala [6]. Na Figura 4 são apresentadas algumas aplicações adesivas na indústria automóvel.



Figura 4 Aplicações de adesivos na indústria automóvel [6].

Na indústria ferroviária a aplicação de adesivos é bastante extensa devido às propriedades das ligações, salientando-se a sua capacidade de amortecer vibrações, isolamento elétrico e redução de peso. Assim, estas ligações são utilizadas para unir os painéis interiores dos vagões, painéis das portas, condutas de ar, entre outros [7]. Na Figura 5 são apresentadas aplicações adesivas na indústria ferroviária.

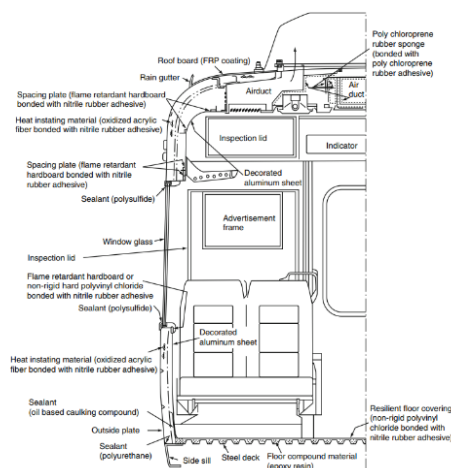


Figura 5 Aplicações adesivas numa carruagem [7].

Na indústria naval as principais características que as ligações adesivas oferecem são a resistência à corrosão e redução de peso global da estrutura. As aplicações vão desde embarcações até plataformas petrolíferas. No caso das embarcações a sua utilização abrange a estrutura do casco, interiores, bem como janelas e acrílicos [8]. Na Figura 6 estão representadas algumas aplicações adesivas na indústria naval.

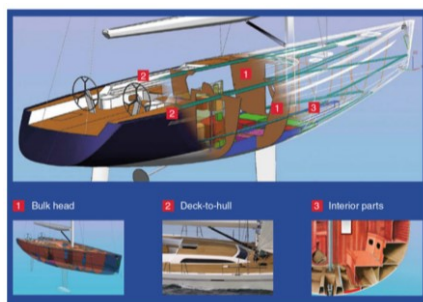


Figura 6 Ligações adesivas numa embarcação [8].

Na indústria petrolífera a aplicação de ligações adesivas são união entre tubos de GFRP, suportes de tubos, e na reparação de tubos, de estruturas navais e reservatórios [9]. Na Figura 7 é possível observar a reparação de um petroleiro, com recurso a ligações adesivas.

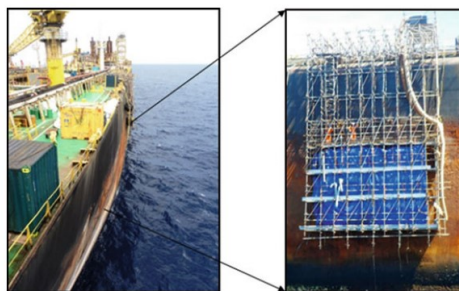


Figura 7 Reparação provisória temporária de um petroleiro com recurso a adesivos [9].

Na construção civil a utilização de adesivos inclui a fixação de azulejos e tijolos, pisos flutuantes, vidros, fachadas de edifícios, e também a ligação de substratos de madeira. Em pontes, as ligações adesivas associadas a outro tipo de ligações também são recorrentes a fim de absorver as vibrações que outro tipo de ligações não consegue com tão alto desempenho. Adicionalmente as lacunas entre partes da estrutura são preenchidas com adesivo melhorando o seu comportamento a esforços como a torção [10]. Na Figura 8 estão representadas esquematicamente algumas aplicações de adesivos na construção civil.

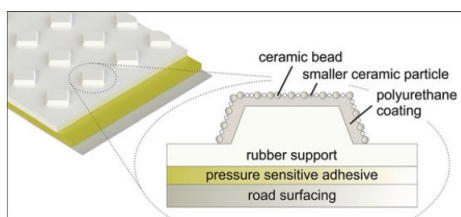


Figura 8 Esquema de aplicação adesiva na construção civil [10].

Existem três tipos de adesivos utilizados normalmente na indústria eletrônica: os condutores isotrópicos, condutores anisotrópicos e não condutores. Os adesivos são utilizados como método de ligação entre chips, e de chips à placa. Estas ligações são utilizadas devido à sua capacidade em reduzir o tamanho bem como o peso do circuito integrado, aliada à possibilidade de introduzir diferentes características de isolamento térmico e elétrico, através da combinação com aditivos ou cargas [11]. Na Figura 9 estão representadas esquematicamente algumas aplicações de adesivos na indústria eletrônica.

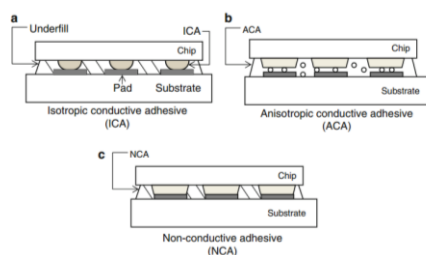


Figura 9 Esquema de aplicações de adesivos na indústria eletrônica [11].

Existem ainda alguns campos em que a utilização de adesivos está em profundo e contínuo desenvolvimento, como de bio-adesivos em aplicações médicas, nomeadamente na ligação de próteses, ligação de tecidos após cirurgia [12], e ligação de placa dentária [13].

2.1.3 Adesivos estruturais

Os adesivos estruturais são adesivos utilizados sobretudo para eficaz transferência de cargas, regra geral possuem uma resistência ao corte superior, e na sua maioria não

apresentam grandes deformações quando solicitados. Em geral, as suas propriedades de resistência variam significativamente quando expostos aos meios ambientes mais comuns [14].

Os adesivos estruturais mais implementados no mercado são os termoendurecíveis, cujo processamento envolve a reticulação de cadeias poliméricas, promovida pela reação química entre uma resina e um endurecedor. Em geral, o processamento ótimo requer um tratamento térmico após a reação de reticulação ou cura. Os adesivos mais comuns baseados em resinas de epóxido, resinas fenólicas, e os poliuretanos [15].

As principais características dos adesivos de epóxido são a grande versatilidade para unir substratos de diferentes características e o facto das suas propriedades serem facilmente melhoradas com recurso a aditivos. Os adesivos de epóxido apresentam elevada resistência à fluência, ao corte e à tração, mas fraca resistência ao arrancamento, que pode ser melhorada com a adição de um polímero mais tenaz. Os epóxidos apresentam baixo índice de contração e durante o seu processamento não ocorre a produção e libertação de voláteis. Geralmente este tipo de adesivo é comercializado sob a forma de um endurecedor e de uma resina de epóxido, separadamente ou previamente misturados. Os adesivos previamente misturados normalmente possuem temperaturas de cura iguais ou superiores a 120°C, já os comercializados separadamente podem ser curados eficazmente até temperaturas próximas dos 5°C [14, 16].

Os adesivos fenólicos são os mais utilizados para unir substratos de madeira e são produzidos através da condensação de fenol e formaldeído, este tipo de adesivos apresenta como principais vantagens a boa resistência mecânica, boa resistência a altas temperaturas e boa estabilidade dimensional. Por outro as principais desvantagens apresentadas por este tipo de adesivo são a baixa resistência à corrosão, sobretudo a solventes, baixo custo e elevada fragilidade. O processo de cura ocorre por volta dos 140°C e durante o processo ocorre a libertação de água. A sua aplicação pode ser através de uma solução de acetona, álcool ou água, ou através de pó posteriormente dissolvido em água. O substrato deve ser poroso para absorver a água libertada, e devido a este facto no processo de produção é necessário aplicar pressão para que o adesivo se espalhe de forma uniforme ao longo da junta, minimizando o aparecimento de vazios. É comum adicionar elastómeros a este tipo de adesivos a fim de melhorar a sua tenacidade e resistência ao arrancamento [14, 16].

Os adesivos de poliuretano são bastante idênticos aos adesivos epóxidos na sua forma e temperatura de cura, geralmente são comercializados sobre a forma de dois componentes, resultantes da reação química entre um polioli e um isocianato. As principais vantagens deste tipo de adesivos são a boa tenacidade, boa resistência química, elevada resistência a baixas temperaturas, boa molhabilidade e flexibilidade, possui elevada resistência ao corte e ao arrancamento, podendo atingir tensões de corte

na ordem dos 30 MPa, e a sua capacidade para unir uma variedade de substratos. A sua utilização é assim adequada em aplicações estruturais. Em contrapartida as principais desvantagens são a sua baixa temperatura de serviço e sua rápida degradação quando exposto a ambientes com elevado grau de humidade [14, 15].

2.1.4 Esforços e modos de rotura

Os tipos de esforços a que uma junta pode estar sujeita são esforços de tração, compressão, corte, arrancamento e clivagem [1, 14].

O esforço de tração é resultante da aplicação de forças perpendiculares aos planos da junta, distribuídas de forma uniforme ao longo da área ligada. Idealmente a junta deve ser projetada de forma a que forças sejam perpendiculares, mas na prática, devido às variações da espessura da camada as forças dificilmente se encontram perfeitamente alinhadas axialmente, e a rotura começa inicialmente com fissuras nas zonas mais frágeis da área de contacto, as extremidades da junta, propagando depois para o centro da junta [1, 14]. Na Figura 10 estão representadas as distribuições de tensões de um carregamento à tração.

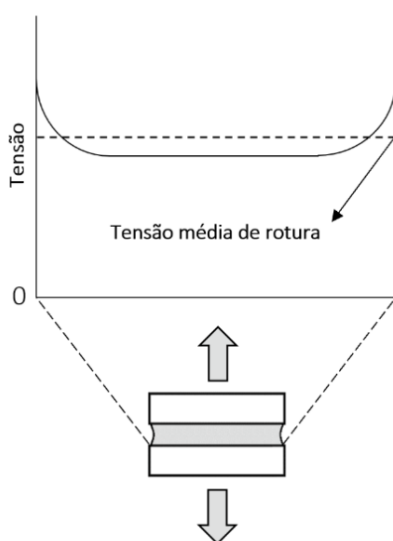


Figura 10 Carregamento de tração e distribuição da tensão ao longo das juntas [adaptado de [1]].

Os esforços de compressão são muito similares aos esforços da tração, mas com sentidos contrários. Numa junta sujeita à compressão pura a utilização de adesivo é dispensável, a rutura só acontece se as tensões não estiverem uniformemente distribuídas [1, 14]. Na Figura 11 são representadas as distribuições de tensões ao longo da junta num carregamento à compressão.

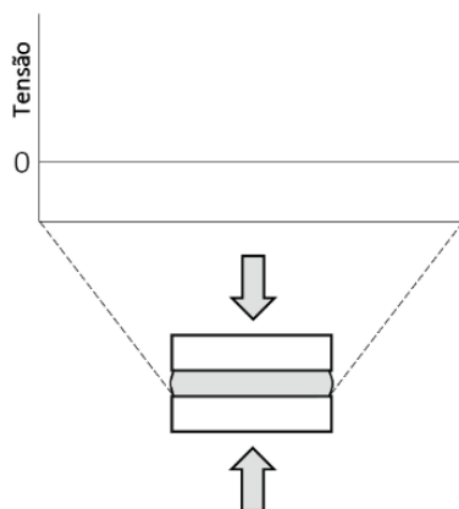


Figura 11 Carregamento de compressão e distribuição da tensão ao longo das juntas [adaptado de [1]].

Os esforços de corte ocorrem quando as forças são paralelas aos planos da junta. Os adesivos utilizados são geralmente mais resistentes numa situação de esforços de corte, visto que área sujeita ao esforço de corte é maior e é relativamente fácil manter os substratos alinhados. As zonas sujeitas a maior concentração de tensões são as extremidades da junta, de facto, dependendo da geometria e das propriedades físicas, as ligações adesivas podem ser compostas apenas por faixas de adesivo nas extremidades da área sobreposta [1, 14]. Na Figura 12 são representadas as distribuições de tensões ao longo da junta num carregamento de corte.

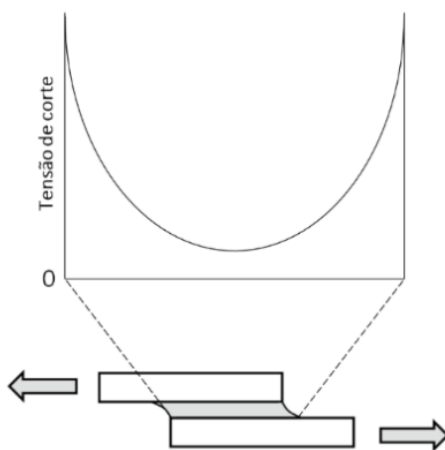


Figura 12 Carregamento de corte e distribuição da tensão ao longo das juntas [adaptado de [1]].

As tensões mais críticas para JSS são as de clivagem e arrancamento, a clivagem é a tensão resultante da atuação das forças na extremidade da junta rígida de forma a separar os substratos. Na Figura 13 são representadas as distribuições de tensões ao longo da junta num carregamento de clivagem.

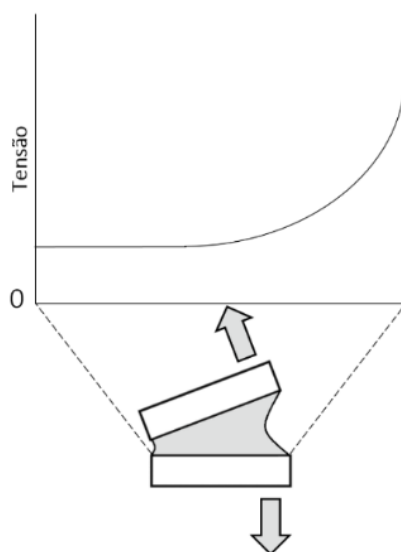


Figura 13 Carregamento de clivagem e distribuição da tensão ao longo das juntas [adaptado de [17]].

O arrancamento ocorre quando pelo menos um dos substratos é flexível fazendo com que o ângulo de separação seja maior do que no caso de clivagem. Devido à concentração de tensões, resultante da área ser muito pequena e de só uma das extremidades estar a suportar este tipo de tensões, a outra pouco contribui para o aumento da resistência. As características que podem ajudar a minimizar este tipo de tensões são a ductilidade e flexibilidade do adesivo, pois quanto maiores, maior é área sujeita a essas forças, diminuindo a contração de tensões [1, 14]. Na Figura 14 são representadas as distribuições de tensões ao longo da junta num carregamento de arrancamento.

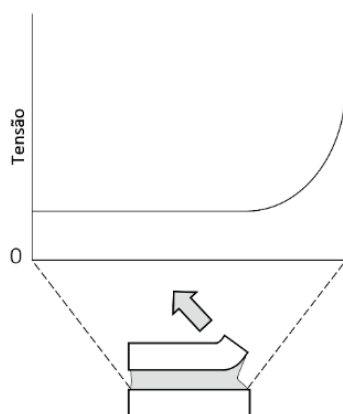


Figura 14 Carregamento de arrancamento e distribuição da tensão ao longo das juntas [adaptado de [17]].

Segundo a norma ASTM D 5573 [18] existem quatro tipos diferentes de rotura dos substratos, rotura adesiva, coesiva, e mista. Os principais fatores que influenciam o modo de rotura são o tipo de carregamento, qualidade e geometria da junta, e a sua correta identificação é fundamental para a caracterização das propriedades do adesivo.

A rotura coesiva ocorre quando a solicitação é superior à resistência do adesivo, ocorrendo a rotura no seu interior. Uma característica deste tipo de rotura é o fato do adesivo cobrir ambas as faces de sobreposição que revela um bom tratamento superficial do substrato na área sobreposta e um aproveitamento máximo da resistência do adesivo [19, 20]. Na Figura 15 está representada esquematicamente uma rotura coesiva.

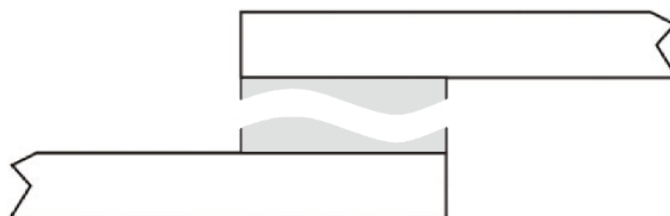


Figura 15 Representação esquemática da rotura coesiva [adaptado de [19]].

A rotura adesiva ocorre na interface entre o aderente e o adesivo, neste tipo de rotura o adesivo apenas se encontra num dos substratos. A falha de adesão entre o substrato e o adesivo, devido à má preparação da área sobreposta, é frequentemente a causa para este tipo de rotura. Na Figura 16 está representada esquematicamente uma rotura adesiva.



Figura 16 Representação esquemática da rotura adesiva [adaptado de [19]].

É comum classificar erradamente o tipo de rotura como adesiva, quando na realidade a rotura é coesiva quando o substrato apresenta uma camada muito fina de adesivo num dos substratos, a este tipo de rotura chama-se rotura coesiva na interfase [19, 20].

A rotura mista é uma combinação entre roturas coesiva e adesiva, a ocorrência deste tipo de rotura prende-se sobretudo com uma má preparação do adesivo e fabrico da junta ou com a limpeza não uniforme dos substratos [14]. Na Figura 17 está representada esquematicamente uma rotura mista.

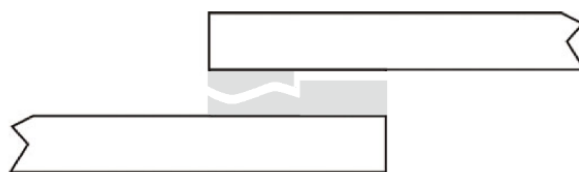


Figura 17 Representação esquemática da rotura mista [adaptado de [19]].

A rotura do substrato ocorre por ação das forças de tração. Este modo a par com a rotura coesiva são modos de rotura preferenciais uma vez que a resistência do adesivo na junta é utilizada na totalidade [14]. Na Figura 18 está representada esquematicamente uma rotura pelo substrato.

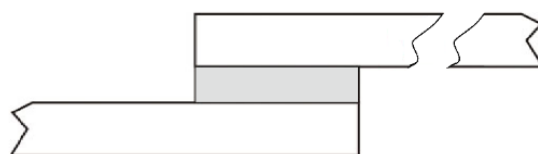


Figura 18 Representação esquemática da rotura do substrato [19].

2.1.5 Configurações possíveis de junta

A direção ideal da solicitação do adesivo deverá ser aquela que apresenta melhores propriedades mecânicas. Atualmente existem infinitas formas de configurações de junta, mas é importante reconhecer que é dever do engenheiro perceber que algumas são de evitar devido aos custos, complexidade geométrica e tempo de execução. Os tipos de juntas mais recorrentes são as juntas de sobreposição simples, em T e de canto, com tira, cilíndrica e de topo.

A junta de sobreposição simples é uma configuração bastante utilizada pelo facto de ser fácil de fabricar e sujeitar a junta a esforços de corte, contudo à medida que a solicitação aumenta este tipo de juntas tende a deformar criando tensões de arrancamento nas extremidades da área sobreposta [1, 5, 14]. Na Figura 19 está representada esquematicamente uma JSS.

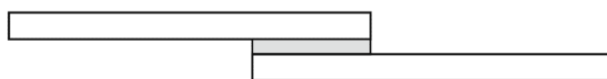


Figura 19 Representação esquemática de uma JSS [19].

As juntas em T e de canto são juntas utilizadas quando existe alguma complexidade geométrica, a sua principal função é diminuir as tensões de arrancamento no adesivo. As juntas em T regra geral são juntas em que os substratos fazem um ângulo de 90° entre eles, podendo o ângulo ser diferente. As juntas de canto são juntas cuja

configuração permite unir os cantos dos substratos recorrendo a adesivo [1, 5, 14]. Na Figura 20 estão representadas esquematicamente juntas de canto e em T.

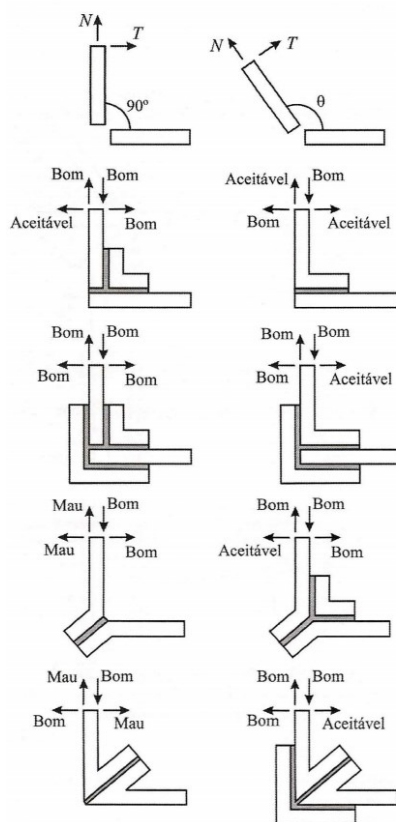


Figura 20 Representação esquemática de juntas em T e de canto [14].

As cobre-juntas ou *strap joints* tem como principal característica relativamente às juntas de sobreposição a utilização de tiras para unir os substratos. A redução do momento fletor que consequentemente diminui as tensões de arrancamento, é a vantagem mais procurada neste tipo de soluções. Do ponto de vista da sua produção este tipo de juntas traz desvantagens uma vez são necessárias mais operações, aumentando o tempo de produção comparativamente às juntas de sobreposição simples [1, 5, 14]. Na Figura 21 está representada esquematicamente uma cobre-junta.

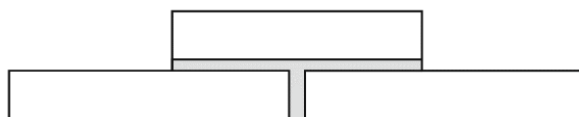


Figura 21 Representação esquemática de uma cobre-junta [1].

As juntas cilíndricas são uma alternativa relativamente às juntas de topo quando existe a necessidade de ligar tubagens e varões, entre outros. O facto de a área de contacto aumentar diminui as tensões instaladas bem como as tensões de arrancamento. Existem contudo dificuldades associadas à produção deste tipo de junta, devido ao facto de ser

frequentemente necessário maquinar os substratos [1, 5, 14]. Na Figura 22 está representada esquematicamente uma junta cilíndrica.

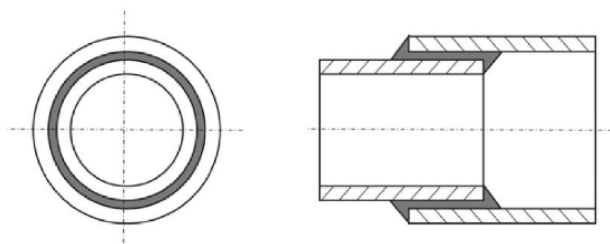


Figura 22 Representação esquemática de uma junta cilíndrica [1].

As juntas de topo são as juntas cuja produção é mais simples, contudo a sua fraca resistência relativamente a esforços de flexão leva ao aparecimento de tensões de clivagem. Este aspeto pode ser melhorado com recurso a alterações geométricas, mas em contrapartida encarece a sua produção visto que são necessárias mais operações para produzir a junta [1, 5, 14]. Na Figura 23 está representada esquematicamente uma junta topo a topo.



Figura 23 Representação esquemática de uma junta topo a topo [1].

2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas

Existem vários métodos de prever a resistência de juntas adesivas, que podem ser divididos em dois grupos: métodos analíticos, e métodos numéricos. Os métodos analíticos geram as equações que permitem obter a distribuição de tensões, recorrendo a critérios da mecânica dos meios contínuos. Os métodos numéricos mais relevantes para esta dissertação são a mecânica da fratura, o modelo de dano coesivo, a mecânica do dano, e o método dos elementos finitos estendido.

2.3 Métodos analíticos

O primeiro modelo de análise de tensões a abordar parte do pressuposto que os substratos não sofrem deformação e que a deformação no adesivo ocorre apenas na direção das tensões de corte. Volkersen [21] iniciou uma abordagem de deformação diferencial (*differential straining* ou *shear lag analysis*), uma distribuição de deformação nos substratos, surgindo na interface do adesivo com o substrato tensões de corte não homogêneas, sendo máximas nas extremidades da área sobreposta. Posteriormente Goland e Reissner [22] sugeriram um modelo que tinha em consideração a rotação da junta, causando um momento fletor que por sua vez gera tensões transversais de

arrancamento, sendo assim possível quantificar essas tensões. Estes modelos têm como pressuposto a ocorrência de deformações elásticas, e não contemplavam a deformação plástica dos adesivos e dos substratos. Com o desenvolvimento dos adesivos tornou-se importante analisar este fenômeno, e Hart-Smith [23] surgiu com um modelo numérico que tinha em consideração essas deformações, que mostrou um aumento da resistência da junta devido à sua deformação plástica. A análise também pode ser modificada para contemplar a distribuição de tensões em materiais laminados compósitos, para isso foram criados os modelos de Wah [24], e Renton e Vinson [25].

2.4 Métodos numéricos

2.4.1 Mecânica da fratura

Na mecânica da fratura a estrutura comporta-se não como um meio contínuo, mas sim como tendo lacunas, e é possível analisar se os defeitos podem levar à rotura ou se os impactos da existência de lacunas não representam qualquer problema se as fissuras não atingirem dimensões críticas. A fissuração pode acontecer por motivos tão distintos como deformações, variação de temperatura, fadiga, aplicação de cargas dinâmicas e estáticas, entre outros. Em teoria sempre que o ângulo entre duas faces adjacentes é inferior a 180° ocorre uma singularidade, que pode ser extrapolada para uma singularidade de tensões na interface de dois materiais ligados, continuando a existir uma descontinuidade de tensões, mas deixam de existir superfícies livres [14]. O estudo da mecânica da fratura iniciou-se com Griffith [26] que conseguiu, através do estudo de fibras de vidro, concluir que os corpos apresentam defeitos e que a fenda se inicia no mais crítico.

Na indústria aeronáutica iniciou-se o conceito de projeto com tolerância de dano, que tinha como base conceitos de fratura linear elástica. Os materiais dúcteis apresentam um comportamento plástico antes de iniciar a fenda, que depois se propaga de forma estável até à rotura [27], esta particularidade faz com que a teoria da mecânica linear elástica não seja a mais apropriada para estudar este tipo de materiais. Para modelar materiais com comportamentos dúcteis foi criada a solução HRR (Hutchinson-Rice-Rosengreen) por Hutchinson [28] e Rice [29].

2.4.2 Modelo de dano coesivo

O MDC teve início com Barenblatt [30] e Dugdale [31], que analisaram a propagação de fendas, na sua frente. Quando sujeitas a cargas estáticas, e a partir daqui foi possível estudar o início da fenda, bem como a sua propagação, a delaminação de compósitos entre outros. Os MDC abrangem campos tão amplos de estudo que vão desde o comportamento de elementos de mola até ao estudo de elementos coesivos [32]. Os modelos MDC podem ser utilizados pelos MEF tornando-se assim possível modelar e

analisar as estruturas quando começam a surgir as fendas [33]. Com o MDC é possível induzir e simular zonas de propagação de dano, sendo para isso estabelecidas leis de coesão que permitem modelar a zona da interface. Existem dois tipos de aproximação utilizadas para as leis de coesão: a aproximação contínua que simula uma camada fina de material entre os dois materiais, isso representa a ligação adesiva [34], ou a aproximação local que consiste em ligar os nós coincidentes dos diferentes materiais [35]. O estudo da propagação de uma fenda através MDC recorre às leis da tensão deslocamento entre os nós ao longo da fenda, através dos quais é possível prever a evolução elástica da tensão até à sua rotura, sendo assim possível simular a degradação das propriedades mecânicas do material ao longo da sollicitação. Geralmente os MDC recorrem a leis de tração criadas por relações lineares nas diferentes etapas da sollicitação, embora existam outras formas de representar o comportamento dos materiais [36].

Existem vários tipos de MDC: o modelo triangular [37], exponencial [38], trapezoidal [34], linear parabólico [38] e polinomial [39].

Devido à sua boa aproximação às condições reais e número reduzido de variáveis a ser determinadas, o modelo triangular é bastante utilizado dentro dos MDC [40]. Este modelo tem como base o MEF de interface [41], e existem dois modos para este tipo modelo modo puro e misto, o modo puro assenta no pressuposto da propagação do dano ocorrer num conjunto de nós iguais em que os valores das tensões são anulados na lei coesiva, o modo misto assenta em critérios energéticos e de tensões a fim de combinar os modos puros de tração e corte [42].

Outro modelo coesivo muito aplicado é o modelo trapezoidal, que é utilizado para estudar o comportamento mecânico de camadas finas de adesivos dúcteis modos, o I [42] e II [43].

Um dos aspetos mais importantes nas análises de MDC é a determinação e calibração dos parâmetros coesivos, a fim de obtermos com a máxima precisão, o comportamento mecânico até à rotura [44].

Existe uma grande variedade de estudos sobre a definição dos parâmetros coesivos (t_n^0 , t_s^0 , G_{Ic} e G_{IIc}), e existem vários métodos para analisar os dados: o método direto, indireto e o de definição individual de parâmetros. Isto acontece por que alguns parâmetros como t_n^0 e t_s^0 não estão padronizados, o que resulta em diferentes graus de complexidade e precisão [34, 45].

Sendo os parâmetros coesivos G_{Ic} e G_{IIc} comuns a todos os métodos torna-se crucial determiná-los, para isso, regra geral recorreremos aos ensaios DCB e ENF, respetivamente.

No ensaio DCB dois substratos são unidos por uma ligação adesiva, e durante a produção é intencionalmente criada uma fenda numa das extremidades do provete. Assim é

possível obter uma expressão para o valor de G_{Ic} pelo método de integral $-J$ pois este método permite obter uma lei coesiva através das relações entre tensões e deslocamentos na extremidade da fenda [29, 43, 46]. Na Figura 24 está representado esquematicamente um ensaio DCB.

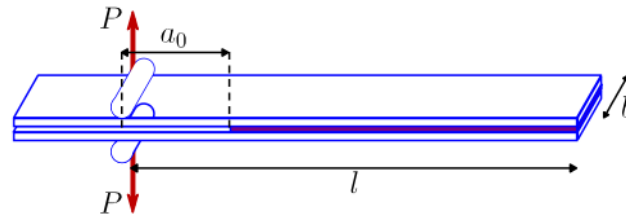


Figura 24 Representação esquemática de ensaio DCB [47].

Uma norma deste ensaio é ASTM D3433, para determinar a altura mínima do substrato (h), de modo evitar deformação plástica dos mesmos no decorrer do ensaio, que sugere a equação (1), em que T representa 150% da carga máxima necessária para iniciar a propagação da fenda, a é o comprimento da fenda, σ_y a tensão de cedência do substrato e B a largura do substrato [48].

$$h = \sqrt{\frac{6Ta}{B\sigma_y}} \quad (1)$$

O ensaio ENF consiste no carregamento a meio do provete, duplamente apoiado, e tal como no ensaio DCB é criada intencionalmente uma fenda numa das extremidades do provete. O carregamento origina a propagação da fenda sem separação dos substratos, e para que a fenda se propague de forma estável o comprimento inicial da fenda não deve ser inferior a 70% do comprimento total do provete [49]. Uma das grandes complexidades deste tipo de ensaios é a dificuldade em medir com exatidão a propagação da fenda tornando-se difícil uma correta estimativa do valor de G_{Ic} [50]. Na Figura 25 está representado esquematicamente um ensaio ENF.

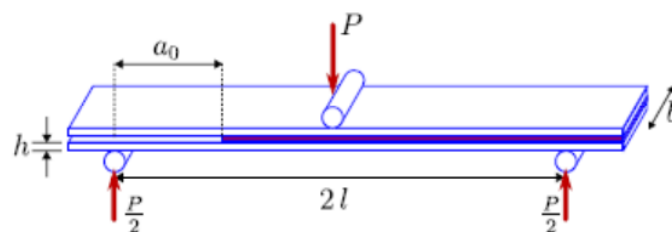


Figura 25 Representação esquemática de ensaio ENF [47].

O método direto calcula os MDC da ligação adesiva através das curvas $G_I-\delta_n$ ou $G_{II}-\delta_s$ de ensaios caracterização da junta à fratura, caracterizadas através de testes de fratura como DCB (tração) ou ENF (corte), estes permitem descobrir os valores de G_I e G_{II} em

função do deslocamento da extremidade da fenda δ_n e δ_s , obtendo assim as leis coesivas à tração e ao corte.

Para determinar a taxa de libertação de energia em Modo I, G_I , recorre-se ao ensaio de DCB aplicando o conceito de balanço energético e de teoria das vigas [46], assim temos a equação (2).

$$G_I = 12 \frac{(P_u a)^2}{E h^3} + P \theta_0 \text{ ou } G_I = P \theta_P \quad (2)$$

É possível determinar o valor de G_{Ic} em função da carga por unidade de comprimento (P_u), rotação relativa dos aderentes na extremidade da fenda (θ_0), módulo de *Young* dos aderentes (E) e a rotação relativa dos aderentes na linha de carga (θ_P). Com base na equação fundamental do integral -J de Rice [29], foi possível a Campilho et al. [51] determinar o valor de G_{Ic} através da lei coesiva representada na equação (3).

$$G_I = \int_0^{\delta_n^f} t_n(d_n) d_n \quad (3)$$

Em que δ_n^f corresponde à abertura da fenda aquando da rotura, δ_n corresponde à abertura da fenda atual e t_n é a tensão à tração aplicada, resolvendo o integral determina-se a lei coesiva à tração, obtendo a equação (4).

$$t_n(d_n) = \frac{\partial G_I}{\partial d_n} \quad (4)$$

Os valores de G_I devem ser enquadrados na curva G_I - δ_n .

O modo de fratura II é obtido através do ensaio ENF, e para calcular G_{II} recorreremos ao método do integral -J [52], resultando na equação (5).

$$G_{II} = \frac{9}{6} \frac{(P_u a)^2}{E h^3} + \frac{3}{8} \frac{P_u \delta_n}{h} \quad (5)$$

Tal como utilizado para o modo I é possível descrever G_{II} na seguinte equação.

$$G_{II} = \int_0^{\delta_s^f} t_s(d_s) d_s \quad (6)$$

em que δ_s^f corresponde ao deslocamento na ponta da fenda ao corte aquando da rotura e δ_s ao deslocamento na extremidade da fenda atual. Resolvendo o integral obtém-se a equação,

$$t_s(d_s) = \frac{\partial G_{II}}{\partial d_s} \quad (7)$$

Assim, é possível descrever uma lei coesiva de corte através da relação entre t_s e d_s .

Outro método utilizado pelo MDC é o método inverso, que consiste em, de forma iterativa ajustar os dados obtidos por MEF aos resultados experimentais, recorrendo à variação dos parâmetros coesivos. Inicialmente, é necessário modelar a junta adesiva de forma precisa, depois, com conhecimento do comportamento mecânico do material em análise criam-se leis coesivas aproximadas. Este método é assim capaz de prever de forma precisa o comportamento da junta adesiva [53], recorrendo a padrões de ajuste iterativo, tais como as curvas R [54], o perfil de abertura de fenda [55] ou a curva $P - \delta$ [56].

Para realizar uma análise através do método de definição individual de parâmetros, é necessário escolher a lei coesiva para o material, tendo em conta as propriedades mecânicas conhecidas [57], para posteriormente calcular separadamente todos os parâmetros das leis coesivas, recorrendo a ensaios experimentais. No mínimo, um dos parâmetros das leis coesivas resulta da extrapolação do adesivo como sendo um material sólido maciço, e assim é possível utilizar essas propriedades como aproximações para os valores de t_n^0 e t_s^0 , e como os parâmetros coesivos dependem da espessura quer do substrato quer do adesivo, é expectável uma discrepância entre os valores reais e os obtidos através deste método [58]. Através do trabalho de Campilho et al. [59] é possível obter a partir da curva de tensão deformação de provetes de adesivo maciço determinar t_n^0 e δ_n^s . Foi observado por Anderson e Stigh [60] que os valores de resistência de t_n^0 são da mesma ordem de grandeza da resistência à tração de adesivos maciços, e que δ_n^s e δ_s^s não são de elevada importância na obtenção de resultados numéricos, isso foi comprovado pelos autores através de uma análise de sensibilidade numérica, onde t_s^0 é estimado a partir de t_n^0 , recorrendo ao critério de Von-Mises para materiais isotrópicos.

Como a relevância de δ_s^s é reduzida, ele é obtido supondo que a lei coesiva de corte é igual à lei de tração, e os valores de G_{Ic} e G_{IIc} são obtidos através dos ensaios DCB e ENF, respetivamente.

2.4.3 Mecânica do dano

A mecânica do dano permite, relativamente a outros métodos, a introdução de dano nos elementos através da redução de esforços transmitidos. Os métodos da mecânica do dano utilizam um parâmetro de dano a fim de modificar a resposta do material, recorrendo à diminuição da resistência ou rigidez. No trabalho de Daudeville e Ladevèze [61] a mecânica do dano é utilizada para estudar a delaminação de um compósito ou rotura da matriz, já Khoramishad et al. [62] recorreu à mecânica do dano para prever o comportamento de camadas finas de adesivo. Com este método é possível simular de forma gradual o dano e a fratura de uma fenda com trajetória previamente definida ou, numa região finita, de forma arbitrária [32].

Existem dois tipos de variáveis na mecânica do dano, as variáveis que modelam o dano através da redefinição de propriedades mecânicas, que não estão diretamente relacionadas com a mecânica do dano, e as variáveis que estão relacionadas com a definição física de um gênero de dano específico, como a área relativa de micro-cavidades ou dimensão das porosidades [63]. O crescimento do dano, segundo a mecânica do dano, é definido em função da carga para simulações estáticas [64] ou do número de ciclos para análise quando sujeita a um esforço de fadiga [65, 66]. Recorre-se à mecânica do dano caso o trajeto da propagação da fenda não seja conhecido, visto que através dos MDC a propagação da fenda é limitada a trajetórias pré-definidas ou caso o dano seja generalizado [67].

No trabalho de Huan et al. [68] o método de mecânica do dano utilizado produz resultados independentes da malha, para assim conseguir efetuar de forma mais precisa uma previsão de resistência de juntas adesivas sujeitas a degradação ambiental e em que o adesivo tem um comportamento dúctil, para conseguir reproduzir este efeito nos modelos numéricos é introduzido um parâmetro de dano, que tem como base o deslocamento na equação constitutiva dos materiais, dependente do grau de humidade, a obtenção deste parâmetro é conseguida através de ensaios à fratura em provetes à flexão em modo misto, permitindo reduzir os valores tensão dependendo do deslocamento plástico equivalente, assim os resultados obtidos são independentes da malha.

Na obra de Chen et al. [69] a mecânica do dano foi utilizada em JSS, tendo como base a carga de rotura e a energia de deformação plástica média para o início e propagação do dano. Esta técnica consiste em primeiro determinar uma solução que converge num dado incremento de carga, de seguida é analisado se existiu rotura em algum dos elementos de rotura, admitindo que os valores de E e coeficiente de *Poisson* adquirem valores muito próximos de zero na iminência de rotura.

2.4.4 Métodos dos Elementos Finitos Extendido

O MEFX é uma nova abordagem ao MEF, na qual é possível analisar e modelar o crescimento do dano a fim de prever fratura do elemento. Este método prevê a iniciação do dano através da resistência dos materiais e deformações para avaliar a rotura, em vez de t_n^0/t_s^0 ou δ_n^0/δ_s^0 (deslocamentos de tração e corte correspondentes a P_{max}). Com o MEFX não é necessário que a fenda tenha uma propagação pré-definida, o que, comparativamente com o MDC é uma vantagem, uma vez que deixa de ser necessário que a malha coincida com a geometria das discontinuidades, e refazer a malha na proximidade da fenda [70]. É através do trabalho de Belytschko e Black [71], que surgem os primeiros fundamentos de MEFX, tendo como base o conceito de partição de unidade. Este conceito foi implementado no MEF através de funções enriquecimento local para os deslocamentos perto da fenda permitindo assim o seu crescimento e separação das faces da fenda [72]. As funções de enriquecimento, necessárias nos

pontos nodais dos elementos finitos perto da extremidade da fenda, resultam da necessidade de quantificar parâmetros variáveis como crescimento, posição e orientação da fenda, dependendo das condições de carga e geometria da estrutura.

A análise de MEFX considera que a junta tem inicialmente um comportamento linear elástico, representado por uma matriz constitutiva elástica de deformações normais e de corte, em função das tensões. A simulação do dano e rotura é constituída por critérios de iniciação e leis do dano, entre nós projetados e nós reais dos elementos fraturados. Os critérios de iniciação do dano podem ser resultado das tensões principais máximas ou deformações principais máximas, e ao invés das leis de tração de separação que caracterizam a degradação dos materiais até à sua rotura, podem ser lineares ou exponenciais.

Os MEFX foram utilizados por Campilho et al. [73] a fim de prever a resistência de juntas de sobreposição simples e dupla, unidas por um adesivo dúctil, e os resultados comparados com os obtidos por MDC. Devido ao facto de a direção da fenda ser perpendicular à tensão principal máxima, a propagação do dano é na direção dos substratos e não ao longo da camada de adesivo, o que não traduz corretamente o comportamento real das juntas, e assim o MEFX não é a melhor análise para a propagação do dano em modo misto, comparativamente aos MDC, com resultados do comportamento da junta mais próximos dos reais. Na Figura 26 estão representadas as tensões instaladas numa JSS.

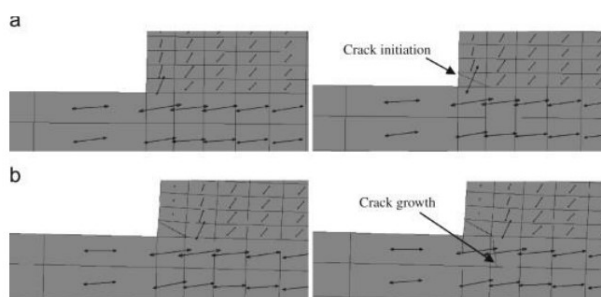


Figura 26 Representação das tensões instaladas numa JSS: iniciação do dano no adesivo nas extremidades da área sobreposta (a) e crescimento do dano no alumínio aderente de alumínio (b) [73].

2.5 Materiais compósitos

A utilização de materiais compósitos por parte da humanidade é algo que remonta aos seus primórdios, e os primeiros relatos são a utilização de um aglomerado à base de argila e palha. A partir do séc. XX este, tipo de materiais começa a ter grande importância nas mais diferentes áreas da indústria, fatores como a sua baixa densidade, a elevada rigidez, a resistência mecânica e facilidade de processamento, fundamentais para a sua larga implementação [74].

2.5.1 Princípios fundamentais

Um material compósito é um material constituído por dois ou mais materiais distintos, e a sua maior valia prende-se com o fato de assim ser possível que este novo material beneficie das melhores propriedades dos seus constituintes resultando por vezes até no aparecimento de novas propriedades. Por outro lado também é possível propriedades desapareçam e outras piores [75].

Através da combinação de materiais conseguimos ter um rácio de resistência/peso cinco vezes maior nos compósitos do que nos aços e um rácio de rigidez/peso oito vezes maior comparativamente aos metais estruturados [76].

Geralmente os materiais compósitos são constituídos por reforços e matrizes, o reforço tem como função garantir rigidez e resistência, devido às suas propriedades físicas e mecânicas, já a matriz deve manter a estrutura coesa, facilitar a sua produção, munir o material de alguma ductilidade, bem como envolver o reforço criando a forma do material, e transferência de carga para as fibras [74].

Na Tabela 2 são apresentadas as principais vantagens e desvantagens do uso de materiais compósitos.

Tabela 2 Vantagens e desvantagens de materiais compósitos [76].

Vantagens	Desvantagens
Permitem uma redução no peso dos componentes;	Custo elevado dos materiais;
Diversidade da forma que podem apresentar;	Por vezes requer o recurso a métodos computacionais sofisticados;
Facilmente coloríveis;	A preservação da cor e do brilho nem sempre é previsível;
Translúcidos;	Conhecimento do seu comportamento, métodos de ligação e formas de acabamento ainda foram pouco aprofundados (em comparação com materiais tradicionais);
Possibilidade de manipular as suas propriedades, tais como a resistência, rigidez, condutibilidade elétrica e térmica;	Mais sensíveis a mudanças de temperatura, fogo e radiação ultravioleta;
Baixos custos de manutenção;	Processos de fabrico, por vezes, lentos e dispendiosos.
Boa durabilidade;	
Possibilidade de fabrico automatizado.	

Os materiais constituintes das fibras mais comuns na indústria dos compósitos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 Tipos de fibras mais comuns na indústria dos compósitos [77].

Material de reforço	Descrição
Vidro	A fibra de vidro é um dos materiais mais usados nos polímeros. Dos vários tipos de fibras de vidro podem-se destacar o tipo “E”, o tipo C, e o tipo “S”. As fibras do tipo “E” caracterizam-se por ser terem bastante resistência e serem baratas. As fibras do tipo S são mais rígidas e são das fibras com maior resistência à tração. Estas fibras são mais dispendiosas do que as do tipo E. As fibras do tipo C são as que apresentam melhores propriedades de resistência à corrosão.
Carbono	Material que resulta da combinação de grafite e carbono amorfo, caracterizado pela sua alta rigidez, baixa densidade e baixa expansão térmica.
Boro	Alto módulo de elasticidade, no entanto, apresenta um custo bastante elevado. É geralmente usado na indústria aeronáutica.
Poliaramida (Kevlar®)	O Kevlar® é uma aramida altamente cristalina, com excelente rácio resistência/peso. Boa resistência ao impacto e à fadiga.
Cerâmicos	Elevado módulo de elasticidade.
Metal	Filamentos de aço são bastante usados.

Consoante a finalidade do material compósito o reforço pode apresentar-se em várias formas. Na Tabela 4 são apresentadas algumas formas de reforços.

Tabela 4 Tipos de reforço de materiais compósitos, adaptado de [1, 5, 8, 11]

Forma do reforço	Descrição
Fibras longas	Fibras longas são usadas em tecidos, podendo ser unidireccionais ou não. Apresentam boa resistência ao impacto, reduzem o empenamento e melhoram a resistência à fluência.
Fibras curtas	As fibras curtas mais utilizadas são as de vidro e de carbono. Adicionar fibras curtas melhora o desempenho do compósito para aplicações leves, e os compósitos são baratos e fáceis de produzir, quando comparados a compósitos com fibras longas.
Fibras contínuas	Geralmente apresentadas sob a forma de <i>roving</i> , as fibras contínuas podem ser orientadas numa só direção, ou em duas direções perpendiculares, fazendo com que o material ganhe resistência nas duas direções. Quando a força é aplicada noutra direção, verificar-se-á uma menor resistência. Utilizados para aplicações de alta performance em processos contínuos de fabricação de compósitos.
Fibras aleatórias	As fibras aleatórias têm propriedades uniformes em todas as direções. Apresentam melhores propriedades de isolamento sonoro.
Fibras entrelaçadas	Os compósitos com fibras entrelaçadas são produzidos pelo entrelaçamento de fibras segundo direções perpendiculares, podendo apresentar vários padrões.
Partículas	Também designadas como <i>fillers</i> . Apesar de serem um material de reforço, este tipo de fibras são geralmente acrescentadas para reduzir o custo ou então para garantir determinadas propriedades, como por exemplo, melhorar propriedades elétricas ou melhorar o processamento da matéria.

A função da matriz ligar é as fibras funcionando assim como um adesivo, ela deve garantir a melhor distribuição de esforços no material transmitindo os esforços às fibras, estando a matriz também sujeita a esforços [78], ela deve ter a rigidez necessária para evitar propagação de quebras nas fibras e caso isso aconteça redistribuir as tensões [79].

Sendo a matriz responsável por garantir a adesão um fator fundamental é viscosidade da matriz, ela não pode ser muito baixa para garantir que as fibras entranhem na matriz e garantir o correto posicionamento das fibras [80].

A matriz tem um papel fundamental no comportamento do compósito quando sujeito a condições de degradação tais como humidade, ambientes químicos e radiação ultravioleta, ela também é fundamental para a qualidade superficial, aspeto visual e para o comportamento do compósito quando sujeito a condições de elevada temperatura, como por exemplo fogo [78]. Nessa medida as condições de trabalho vão determinar a escolha da matriz mais adequada.

Uma escolha correta da matriz deve ter em consideração o material utilizado como reforço, a título de exemplo se os coeficientes de expansão térmica das fibras e do reforço forem muito distintos, quando o material compósito for sujeito a altas temperaturas a sua degradação irá ocorrer de forma mais rápida [79].

Na Figura 27 estão representados os diferentes tipos de matrizes existentes.

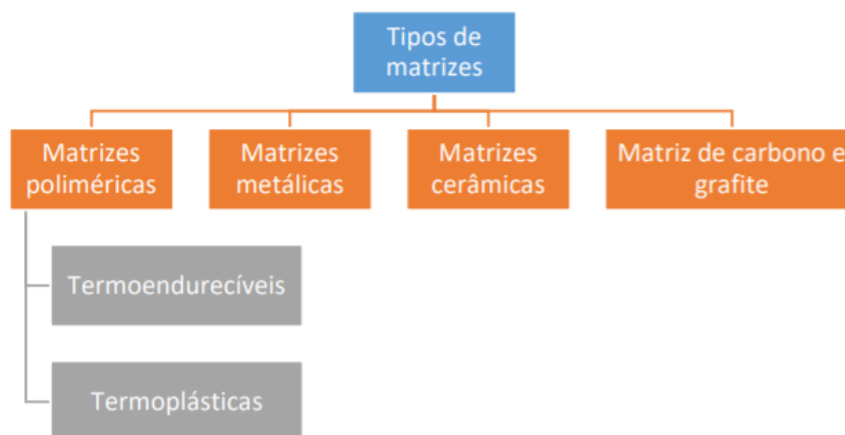


Figura 27 Tipos de matrizes, adaptado de [78].

O uso de matrizes poliméricas, nos materiais compósitos, tem como principais vantagens a baixa densidade, elevada resistência e rigidez, quimicamente são materiais bastante inertes e a elevada resistência à fadiga, no entanto este tipo de matrizes sofre elevada fluência quando exposto a altas temperaturas. Existem dois tipos de matrizes poliméricas as termoendurecíveis e as termoplásticas, cujo comportamento difere muito quando é aquecido.

As matrizes termoendurecíveis não apresentam ponto de fusão nem podem ser dissolvidas após a cura, uma vez que ocorre o processo de reticulação das moléculas [80]. Na Tabela 5 são apresentadas as principais matrizes termoendurecíveis e suas características.

Tabela 5 Características das matrizes [78].

Polímeros termoendurecíveis	Descrição	Aplicações
Resina de poliéster insaturado.	Baixo preço em relação ao epóxido; absorvem mais água, o que pode ser prejudicial.	Indústria automóvel, tanques e tubagens, pedra artificial
Resina de epóxido	Melhor resistência à fadiga; menor contração térmica	Laminas das turbinas eólicas.
Poliimidas	Elevada estabilidade dimensional; resistência a elevadas temperaturas; boa resistência ao impacto; boa capacidade de adesão.	Indústria aeroespacial, microeletrónica, lasers.

As matrizes termoplásticas fundem quando aquecidas e solidificam quando arrefecem. Comparativamente às termoendurecíveis apresentam maior resistência ao impacto, maior tenacidade, muito menor higroscopia, e a capacidade de serem facilmente reprocessadas [74].

As matrizes metálicas são utilizadas quando se pretende boa resistência a elevadas temperaturas, e podem ser de alumínio, magnésio, titânio entre outros [75].

As matrizes de carbono dos compósitos carbono / carbono podem ser obtidas por duas vias: através da carbonização de uma resina orgânica (fenólica e outra) num compósito de fibra de carbono, ou por deposição química da fase de vapor de carbono pirolítico oriundo de um gás de hidrocarbonetos, sobre um reforço de fibras de carbono. Este tipo de matrizes requer um grande gasto de energia e tempo na sua produção [79].

2.5.2 Classes de materiais compósitos

É possível classificar os materiais compósitos a partir três características: de acordo com a forma e orientação, tipo de fibra, e o tipo de matriz.

O tipo de matriz mais recorrente são as matrizes poliméricas termoendurecíveis, as moléculas que formam o polímero são estruturas tridimensionais bastante rígidas, o processamento deste tipo de matriz ocorre quando são misturados dois ou mais componentes, seguindo-se a reação de polimerização e a constituição da estrutura

tridimensional, num processo habitualmente designado por cura [74]. Os principais tipos de resina são:

- Poliésteres insaturados – esta é a mais utilizada resina na produção de materiais compósitos, e as principais características deste tipo de resina são o fácil processamento, estabilidade dimensional, baixo custo e as boas propriedades físicas, mecânicas e elétricas.
- Resinas de epóxico – são utilizados quando se procura obter um material compósito com elevadas propriedades mecânicas, elevada temperatura de serviço e boa adesão. Em contrapartida, este tipo de matriz degrada-se facilmente quando exposta a luz UV, e o seu custo é quatro vezes superior ao das resinas de poliéster. Comparativamente as resinas de poliéster a contração é menor, e assim podem ser misturadas com outras resinas de epóxico para obter materiais com características mecânicas particulares.
- Fenólicas – as suas principais características são: elevada temperatura de serviço, baixa fluência, elevado isolamento térmico e acústico, ótimo comportamento quando exposto ao fogo, e resistência à corrosão. Por outro lado, a libertação de produtos voláteis durante o processo de cura é uma das grandes desvantagens. Este tipo de resinas liberta água aquando da sua produção, existindo a necessidade de a remover durante o processo.

É da competência do reforço conferir ao compósito propriedades mecânicas como, rigidez, resistência à rotura, densidade, entre outros. Os principais reforços utilizados são [14]:

- Fibras de vidro – é utilizado devido à sua alta resistência ao impacto, alto isolamento elétrico, excelentes propriedades mecânicas, baixo índice de degradação quando exposto à humidade e isolante elétrico. Este tipo de reforço é produzido recorrendo ao estiramento do vidro fundido através de uma fieira com orifícios, obtendo assim o reforço com o diâmetro de fibras pretendido.
- Fibras de carbono – têm como principais vantagens a elevada resistência, rigidez, e temperatura de serviço. Em contrapartida a principal desvantagem deste tipo de reforço está associada ao custo, uma vez que é obtido através de pirólise de matéria orgânica, que não deve fundir nem volatilizar, outra desvantagem é a sua elevada corrosão galvânica, que leva à ocorrência fragilidade quando na presença de metais, para prevenir a corrosão é usada uma camada de vidro ou resina entre carbono e o metal. O seu coeficiente de dilatação nulo confere-lhe um papel preponderante em aplicações muito particulares em áreas como a aeroespacial, e metrologia, entre outros.
- Fibras de aramida – conferem ao compósito um bom rácio entre propriedades mecânicas e densidade, boa tenacidade, elevada capacidade de amortecimento, e resistência ao impacto. Este tipo de fibras é quimicamente muito inerte, e é

também bom isolante térmico e elétrico. Como principais desvantagens a baixa resistência à compressão, quando comparado com fibras de vidro e carbono, baixa resistência à flexão e alta suscetibilidade ao corte interlaminar.

Das diferentes formas que um reforço se pode apresentar as mais comuns são fibras contínuas ou curtas, manta, *roving* e tecido. Nos tecidos, a orientação pode ser definida como unidirecional, em que as fibras apresentam todas a mesma direção, bidirecional, onde as fibras apresentam duas direções ortogonais e tridimensional, onde as fibras se orientam num espaço tridimensional [74].

O *Roving* é um fio de filamentos enrolado em bobines, que pode ser usado para obter *roving* fibras curtas ou longas e tecidos, e pode ainda ser usado para produzir mantas, entrançados, malhas ou híbridos.

A manta é constituída por fibras distribuídas de forma aleatória, agregadas por um ligante especial que se dissolve aquando da impregnação da manta (Figura 28). Existem fundamentalmente três tipos de manta, a de filamentos cortados (CSM), a de filamentos contínuos (CFM), e manta de superfície.

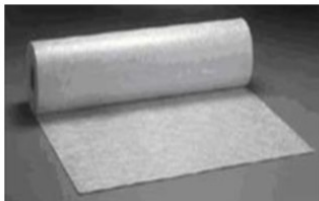


Figura 28 Manta [74]

Existem dois tipos de tecido, os 2D (Figura 29) e os 3D (Figura 30), que são utilizados quando pretende conferir ao compósito elevadas propriedades mecânicas.



Figura 29 Diferentes tipos de orientação dos tecidos 2D [74].

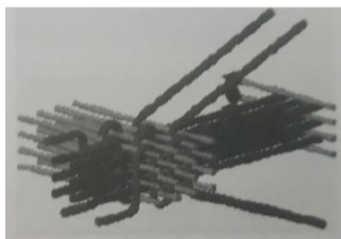


Figura 30 Tecido 3D [74].

Os materiais reforços podem ainda apresentar outras configurações, incluir vários tipos de reforço (reforços híbridos), várias orientações ($\pm 45^\circ$), e diversos tipos de entrelaçamento (simples, *twill* e *satan*) [74].

2.5.3 Caraterísticas

Devido à enorme variedade de matrizes e reforços, os materiais compósitos resultantes podem exibir propriedades muito distintas.

Assim, torna-se fundamental conhecer as especificidades da aplicação para uma correta escolha quer da matriz, quer do reforço, tendo em conta fatores como:

- Rigidez;
- Peso;
- Expansão térmica;
- Resistência à fadiga;
- Resistência à corrosão;
- Aspeto visual;
- Condutibilidade térmica;
- Propriedades eletromagnéticas
- Comportamento acústico.

Sendo as fibras o material no compósito que mais influencia as propriedades mecânicas a sua escolha é crítica para o desempenho do compósito. Nas Tabela 6 e Tabela 7 são apresentadas propriedades mecânicas e físicas típicas das fibras de vidro e carbono, respetivamente.

Tabela 6 Propriedades de fibras de vidro [74].

Propriedade	Vidro E	Vidro S	Vidro R
Tensão de rotura [MPa]	3445	4890	4135
Módulo de elasticidade [GPa]	72,3	86,9	85,5
Densidade [g/cm ³]	2,58	2,46	2,54
Deformação na rotura [%]	4,4	5,3	5,2
Coefficiente de expansão térmico [$10^{-6}/^\circ\text{C}$]	5,0	2,9	4,0

Na Tabela 7 é possível encontrar as fibras de carbono mais utilizadas na indústria, HS significa *high strength*, e são fibras com resistência à tração superior a 3 GPa e um rácio de rigidez / resistência entre 0.015 e 0.02, as HM são denominadas de *high modulus*, são fibras com módulos superiores a 300 GPa e um rácio de resistência / rigidez inferior a 1%, por fim, UHM significa *ultra high modulus* e são fibras que apresentam módulos superiores a 400 GPa [74].

Tabela 7 Propriedades da fibra de carbono[81, 82]

Propriedade	Carbono T800S HS	Carbono M40J HM	Carbono Hexcel® UHM
Tensão de rotura [MPa]	5880	4400	3730
Módulo de elasticidade [GPa]	294	377	440
Densidade [g/cm ³]	1,8	1,77	1,87
Deformação na rotura [%]	2	1,2	0,8
Coefficiente de expansão térmico [10 ⁻⁶ /°C]	-0,6	-1,1	

Comparativamente com as fibras de vidro, as fibras de carbono apresentam maiores tensões de rotura, módulo de elasticidade, e menor densidade, mas devido ao custo é mais comum, dependendo das aplicações, optar-se pelas fibras de vidro. Para grande parte das aplicações é suficiente, uma vez que apresenta boas propriedades mecânicas, pouco abaixo das propriedades das fibras de carbono, mas o seu custo comparativamente com as fibras de carbono é menor, tornando-a assim no tipo de fibra mais utilizada.

Apesar de não tão preponderantes no desempenho mecânico como o reforço, as matrizes assumem um importante papel na consolidação do compósito a título de exemplo, se os coeficientes de expansão da resina e das fibras forem muito distintos podem surgir tensões entre a resina e as fibras [74]. Nas Tabela 8, Tabela 9 e As matrizes mais utilizadas na indústria são as matrizes poliméricas, uma vez que apresentam boas propriedades mecânicas, um custo acessível e facilidade no seu processamento. As matrizes cerâmicas apresentam boas propriedades mecânicas, mas o seu elevado custo e fragilidade faz com que este tipo de matriz seja utilizado em áreas muito específicas como a aeronáutica ou aeroespacial. As matrizes metálicas apresentam boas propriedades, mas um rácio entre propriedades mecânicas e peso consideravelmente mais baixo comparativamente às matrizes poliméricas [83].

Tabela 10 são apresentadas algumas propriedades mecânicas de diferentes tipos de matriz utilizadas pela indústria.

Tabela 8 Propriedades de matrizes poliméricas [74].

Propriedade	Resinas epóxico	de Resina de poliéster insaturado	Policarbonato
Tensão de rotura [MPa]	35-100	40-90	45-70
Módulo de elasticidade [GPa]	3-6	2-4,5	2,2-2,4
Densidade [g/cm ³]	1,1-1,4	1,2-1,5	1,06-1,20
Deformação na rotura [%]	1-6	2	50-100
Coeficiente de expansão térmico [10 ⁻⁶ /°C]	60	100-200	70

Tabela 9 Propriedades de matrizes cerâmicas [74].

Propriedade	Alumina	Silicato de boro	Carbeto de silício
Tensão de rotura [MPa]	300-500	-	-
Módulo de elasticidade [GPa]	380	63	520
Densidade [g/cm ³]	3,9	2,2	2,9
Deformação na rotura [%]	<0,1	<0,1	<0,1
Coeficiente de expansão térmico [10 ⁻⁶ /°C]	6,7	5	4,9

As matrizes mais utilizadas na indústria são as matrizes poliméricas, uma vez que apresentam boas propriedades mecânicas, um custo acessível e facilidade no seu processamento. As matrizes cerâmicas apresentam boas propriedades mecânicas, mas o seu elevado custo e fragilidade faz com que este tipo de matriz seja utilizado em áreas muito específicas como a aeronáutica ou aeroespacial. As matrizes metálicas apresentam boas propriedades, mas um rácio entre propriedades mecânicas e peso consideravelmente mais baixo comparativamente às matrizes poliméricas [83].

Tabela 10 Propriedades de matrizes metálica [74]

Propriedade	Alumínio	Titânio	Magnésio
Tensão de rotura [MPa]	110	600	189
Módulo de elasticidade [GPa]	69	113,8	45,5
Densidade [g/cm³]	2,71	4,51	1,74
Deformação na rotura [%]	<0,1	<0,1	<0,1
Coeficiente de expansão térmico [10 ⁻⁶ /°C]	23	9,5	26

2.5.4 Aplicações

A aplicação dos materiais compósitos nos dias de hoje é massiva, estando presente nas áreas mais distintas da indústria como a aeronáutica, espacial, defesa, automóvel, artigos desportivos, componentes eletrónicos, construção civil, entre outros.

Na aeronáutica são utilizados compósitos de alto desempenho mecânico, principalmente compósitos à base de fibras de carbono aramida, híbridos de carbono e aramida. O objetivo da utilização deste tipo de materiais é obter estruturas com elevada resistência específica, e peso reduzido. Os compósitos podem ser encontrados na cobertura dos estabilizadores horizontais dos F14-A, na cobertura das asas dos F18 na fuselagem exterior do AV-8B [74]. Na Figura 31 estão ilustradas algumas aplicações de materiais compósitos na indústria aeronáutica.

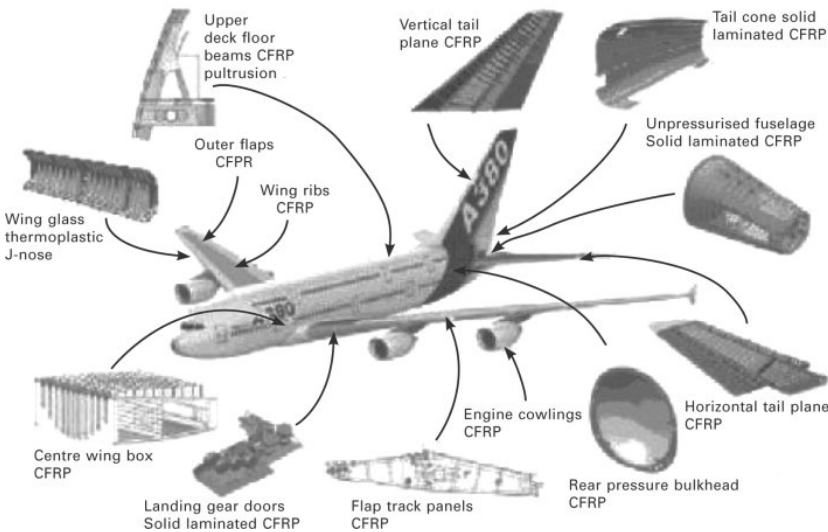


Figura 31 Aplicações de materiais compósitos na indústria aeronáutica[84].

A indústria espacial sofreu uma grande evolução com a utilização de materiais compósitos, uma vez que possibilitou uma grande redução de peso na estrutura dos veículos espaciais sem perda de propriedades mecânicas. Devido ao seu coeficiente de expansão nula as estruturas de fibra de carbono / resina de epóxico, são úteis neste tipo de indústria.

Na indústria automóvel o custo e cadência de produção são fatores importantes, o que leva a que compósitos de matriz de poliéster e reforço de fibra de vidro sejam relevantes nesta indústria. O uso de compósito teve início com a Ford® nos anos trinta, mas foi nos anos noventa que o uso de compósitos se tornou mais preponderante, com a Ford® a produzir cerca de meia centena de peças de automóveis na estrutura, por moldação manual, obtendo uma redução de peso de cerca de 60 % comparado com chapa embutida. Na indústria automóvel de competição, o custo assume um papel secundário uma vez que objetivo é ter a maior vantagem tecnológica possível em relação à concorrência, por exemplo, com a introdução dos compósitos de carbono no chassi permitiu à McLaren® a obtenção de melhores propriedades mecânicas e uma considerável redução de peso. Na Figura 32 estão ilustradas algumas aplicações na indústria automóvel.

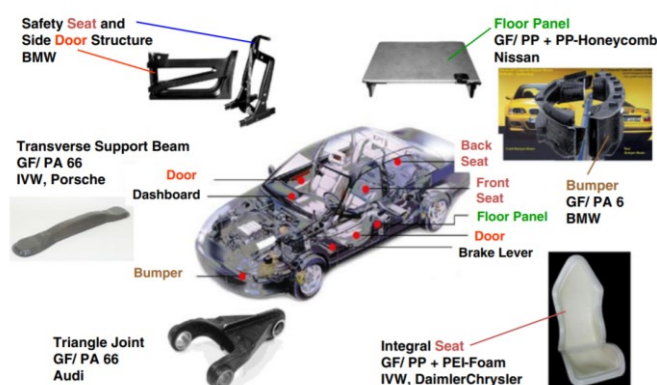


Figura 32 Aplicações de materiais compósitos na indústria automóvel [85]

Na indústria de componentes elétricos e eletrônicos a utilização de compósitos prende-se sobretudo com necessidades de segurança de isolamento elétrico, sendo comum encontrar compósitos em blindagens, circuitos impressos ou baterias.

Outro exemplo da variedade de aplicações de compósitos é a sua utilização em reforços de coluna de pontes em áreas sismicamente ativas, recorrendo a compósitos de carbono/resina de epóxico [74].

2.5.5 Processos

Existem diversas técnicas para o processamento de materiais compósitos, que permitem obter materiais combinando ótimas propriedades mecânicas, e uma grande flexibilidade

na concepção. De facto, as técnicas de fabrico possibilitam a redução do número de peças a integrar num determinado conjunto diminuindo consideravelmente os custos de mão-de-obra associados à montagem. Com o desenvolvimento tecnológico foi possível aumentar progressivamente o grau de automatização dos processos de produção tornando-os economicamente mais apelativos.

Genericamente, os processos podem ser classificados como processos em molde aberto ou em molde fechado. Nos processos de molde aberto apenas uma das superfícies tem bom acabamento, este tipo de processos permite a obtenção de componentes de grandes dimensões e de geometria complexa uma vez que a pressão exercida neste tipo de processos é inexistente. Os processos de molde fechado permitem obter componentes com bons acabamentos em ambas as superfícies e boa reprodutibilidade, e outra vantagem é a menor emissão de produtos voláteis nocivos à saúde.

A seleção do processo de produção deve ter em conta fatores como propriedades mecânicas, dimensões, complexidade geométrica, volume, e taxa de produção, entre outros [74]. De seguida irão ser abordados os principais métodos de produção.

A moldação por injeção é um processo de produção apropriado para produtos de pequena e média dimensão, e oferece liberdade de design, redução de necessidades de montagem, boa reprodutibilidade, e elevada cadencia de produção, não sendo necessárias operações de acabamento [86]. Neste processo, o material, compreendendo uma matriz reforçada com fibras muito pequenas, dá entrada na unidade de injeção através de uma tremonha, e em seguida entra na extrusora de parafuso, onde é derretido e injetado num molde. O compósito é formado, deixado curar e extraído do molde [74, 86]. Na Figura 33 é representada esquematicamente o processo de moldação por injeção.

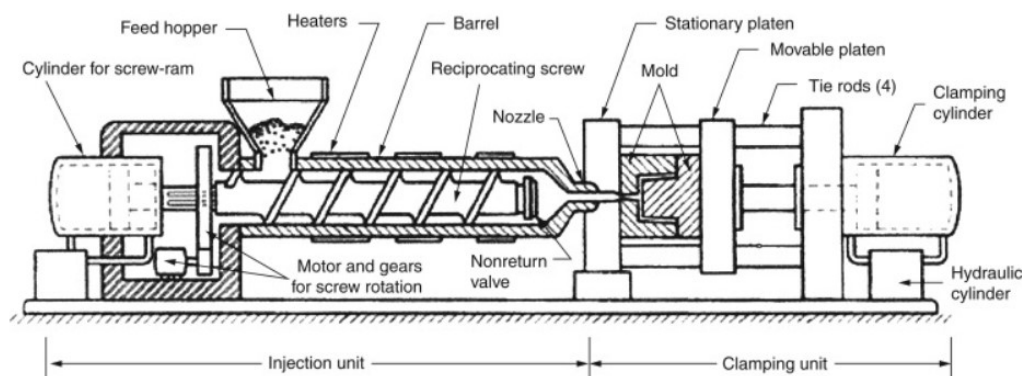


Figura 33 Representação esquemática de moldação por injeção [87]

A moldação manual adequa-se à produção de pequenas séries e com cadencia diária muito baixa. As principais vantagens são a simplicidade do processo, o investimento inicial reduzido e a capacidade de produzir peças de elevada complexidade geométrica.

As desvantagens deste processo são a libertação de gases voláteis e tóxicos, a necessidade de uma quantidade de mão de obra abundante, ser fortemente dependente das habilidades e cuidados dos operários, baixa produtividade, bom acabamento superficial numa só face, teor de fibras heterogêneo, e necessidade de operações de acabamento. Este método consiste no empilhamento e impregnação de sucessivas camadas de reforço. Inicialmente é aplicado um agente desmoldante para facilitar a sua remoção da peça. De seguida é aplicada uma resina de designada *gel-coat* sobre a face do molde a utilizar, para garantir um bom acabamento superficial. O *gel-coat* é endurecido num forno a uma temperatura de 50° C, e por fim as camadas de reforço são aplicadas no molde, impregnadas com a mistura de resina, e compactada com o auxílio de rolos. Neste processo o produto final geralmente tem apenas 25% de fibras, em massa, para fibra de vidro [74]. Na Figura 34 é representado esquematicamente o processo de moldação manual.

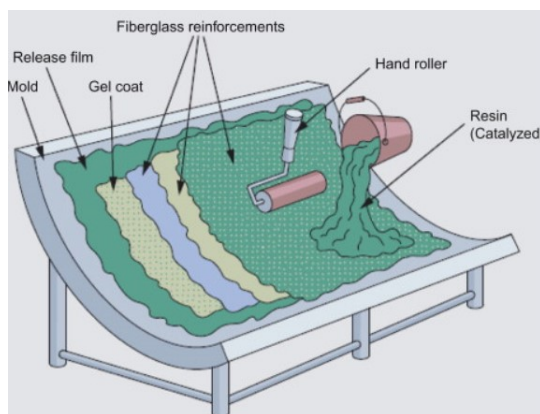


Figura 34 Representação esquemática de moldação manual [88].

A moldação por projeção é similar à moldação manual, distinguindo-se pela forma como as camadas, são aplicadas sobre o molde. Recorrendo a uma pistola de projeção, a fibra (*roving*) é conduzida até à cabeça da pistola, cortada com o comprimento pretendido, e lançada sobre um jato de resina. Tal como na moldação manual, o compósito é compactado com recurso a rolos. É possível automatizar este processo, mas regra geral é feito com recurso a um operador. Este processo adequa-se a pequenas séries e as propriedades mecânicas obtidas são regra geral piores quando comparadas com a moldação manual muito devido ao fato de em média, se conseguirem peças com apenas de 15% fibra [74]. Na Figura 35 é representada esquematicamente o processo de moldação por projeção.

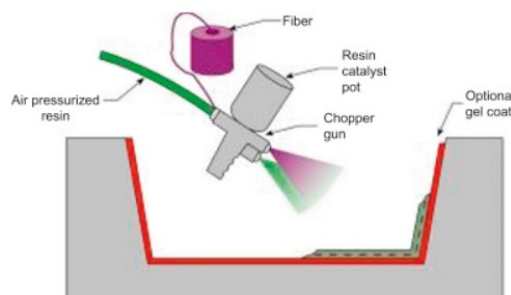


Figura 35 Representação esquemática da moldação por projeção [89].

A moldação por compressão pode ser feita a frio ou a quente, com recurso a um molde onde a matéria prima é colocada, de seguida o molde é fechado e o material adquire a sua forma final. Este processo é utilizado para obter componentes estruturais para automóveis, equipamentos eletrónicos, produtos sanitários, mobiliário urbano, entre outros. Na Figura 36 é representado esquematicamente o processo de moldação por compressão.

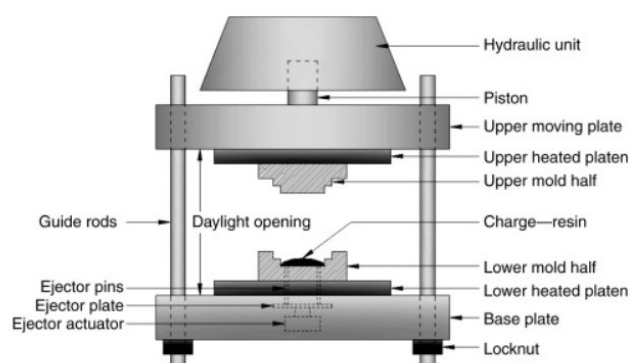


Figura 36 Representação esquemática da moldação por compressão [89].

Na moldação por compressão a frio as resinas aplicadas são geralmente poliésteres insaturados às quais é adicionado um catalisador extremamente exotérmico conseguindo assim um aquecimento progressivo do molde permitindo ter ciclos de moldação adequados à indústria. As pressões e temperaturas associadas a este processo são baixas o que permite a utilização de prensas mais leves e moldes mais baratos. A compressão a frio é adequada para séries médias (4 a 12 peças por hora), o acabamento superficial é pouco cuidado, a precisão geométrica é fraca devido à contração, e são desaconselhados ângulos vivos e partes verticais na geometria da peça.

A moldação por compressão a quente é muito similar à moldação por compressão a frio, as diferenças prendem-se com a utilização de moldes pré-aquecidos, entre os 80° C e os 170° C, pressões de compressão entre os 0.5 e os 15 MPa, e requer o uso de moldes metálicos. Devido à elevada cadencia de produção este processo está amplamente implementado na indústria automóvel.

O processo de moldação por vácuo é muito similar ao processo de moldação por compressão a frio, e consiste na aplicação de vácuo no interior do molde. Neste processo a resina é injetada a baixa pressão no seu interior, o molde, é previamente fechado com o reforço, aplicando o vácuo. As peças podem ser obtidas de forma mais simples se a resina e o reforço forem introduzidos no interior do molde que depois é fechado aplicando-se vácuo no seu interior. Com este processo é possível obter peças com quantidades reduzidas de bolhas de ar, percentagens de fibra a rondar os 70% e bom acabamento em ambas as superfícies, e é adequado para produzir componentes de médias e grandes dimensões, com cadências de produção a variar entre as 500 e 5000 peças por ano. Na Figura 37 é representado esquematicamente o processo de moldação por vácuo.

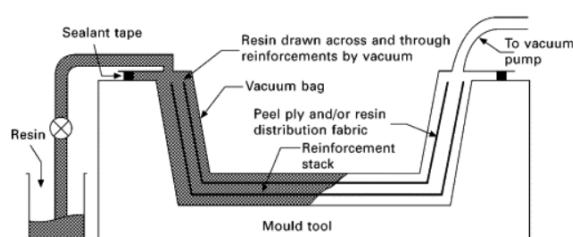


Figura 37 Representação esquemática da moldação por vácuo [89].

O processo de enrolamento filamental consiste na deposição sobre um mandril em rotação de um fio de fibra (*roving*) previamente impregnado com resina. A orientação das fibras é determinada em função das solicitações de serviço, e consegue-se controlando o movimento de translação do carro, e rotação do mandril. De seguida completa-se a polimerização recorrendo a um forno ou a radiação infravermelha. Com recurso a este processo é possível produzir estruturas de reservatórios, peças esféricas, tubos hexagonais entre outros. As vantagens da escolha deste tipo de processo são a simplicidade, automatização, peças com boas propriedades mecânicas (entre 60 e 75% de fibra em peso), e capacidade de produção de peças de grandes dimensões, entre outros. As desvantagens são o número limitado de formas que podem ser produzidas e a dificuldade em obter ângulos baixos. Na Figura 38 é representado esquematicamente o processo de enrolamento filamental.

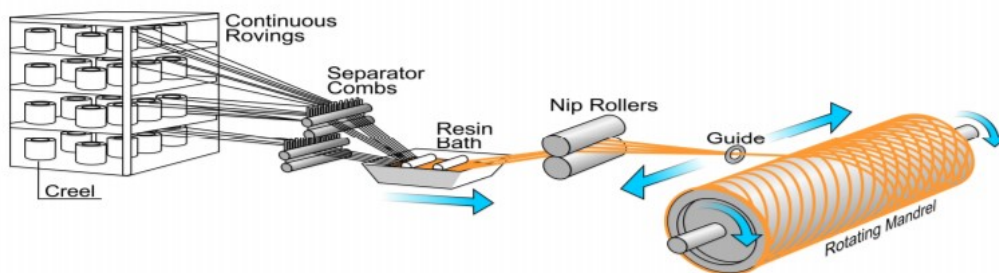


Figura 38 Representação esquemática do processo de enrolamento filamental [90].

Através do processo de pultrusão é possível produzir de forma contínua e completamente automatizada, peças com boas propriedades mecânicas (entre 30 e 70% de fibras em peso) e uma ampla variedade de secções. Para conseguir um bom rigor dimensional e melhorar as propriedades transversais, combina-se o reforço de *roving* com reforços de manta ou tecido. A pultrusão é utilizada quando é pretendido produzir perfis de secção constante de formas distintas, neste processo o reforço é tracionado passando por um recipiente com resina no estado líquido onde é impregnado, o perfil adquire a sua forma passando por uma fieira de aço pré-aquecida, onde ocorre o essencial da polimerização. O perfil é tracionado por um módulo de arrasto, e por fim um sistema de corte confere ao perfil o comprimento desejado. Na Figura 39 é representado esquematicamente o processo de pultrusão.

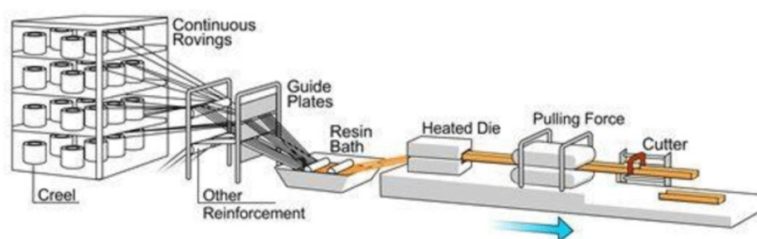


Figura 39 Representação esquemática do processo de pultrusão [91].

A moldação por centrifugação consiste num molde metálico de forma cilíndrica, em rotação onde são introduzidos a resina e o reforço, e por ação das forças de centrifugação dá-se a impregnação do reforço e obtenção da forma da peça. De seguida o molde é aquecido ocorrendo a polimerização. A velocidade de rotação varia consoante a quantidade e natureza do reforço, o diâmetro e espessura da peça e a viscosidade da resina. Este processo é utilizado na obtenção de peças ocas como tubagens, tanques entre outros. As principais vantagens deste processo são a obtenção de peças com bom acabamento superficial em ambas as superfícies recorrendo a um *gel-coat*, e boa reprodutibilidade, entre outros. Por outro lado, o investimento inicial, a limitação de formas geométricas da peça, e a mão de obra qualificada são as principais desvantagens [75]. Na Figura 40 é representado esquematicamente o processo de moldação por centrifugação.

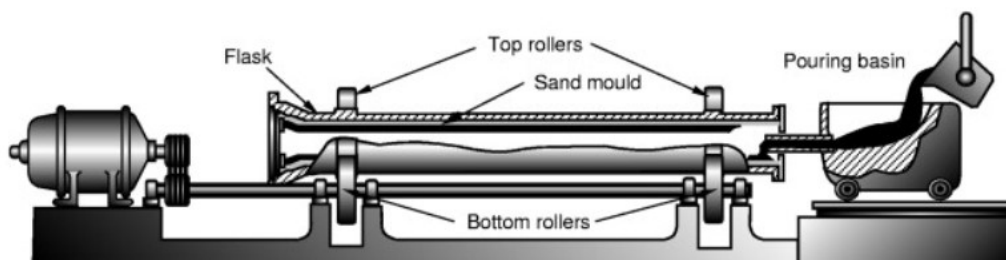


Figura 40 Representação esquemática da moldação por centrifugação (adaptado de [92]).

O processo de moldação por transferência de resina (RTM) tem sido amplamente utilizado para fabricar formas simples e complexas de componentes de automóveis, aeronaves e naves espaciais, com elevada resistência e rigidez específicas. Este processo encontra-se implementado em vários setores, sempre que seja necessário baixo custo de produção com alta cadência em comparação com outros processos, como moldação por compressão e moldação manual. O reforço, chamado pré-forma, é organizado na configuração desejada e colocado na cavidade do molde de duas partes. O molde é fechado e, em seguida, uma resina catalisada é transferida para o interior através de um jito. As matrizes que podem ser usadas no processo RTM incluem resinas de poliéster, vinil - éster, epóxico, fenólicas e acrílicas. Os reforços podem ser sob a forma de tecido móvel, esteira contínua, unidirecional, e tecidos 2D e 3D [74, 86]. Na Figura 41 é representado esquematicamente o processo de moldação por RTM.

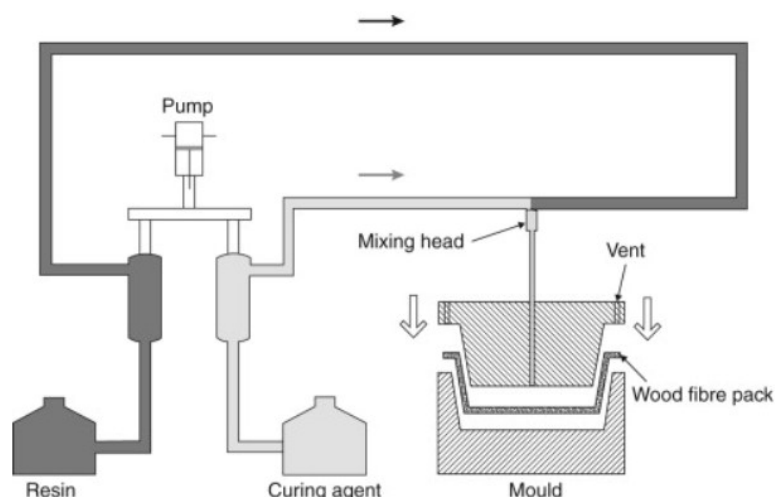


Figura 41 Representação esquemática da moldação por RTM [93].

A moldação em autoclave é o processo geralmente utilizado na obtenção de laminados com pré-impregnados (descritos no subcapítulo 2.5.6). Inicialmente corta-se e empilha-se camadas de pré-impregnado sobre o molde com a sequência de camadas pretendida, de seguida o conjunto é colocado num saco de vácuo e sujeito a um ciclo de pressão, temperatura e vácuo, em simultâneo. Embora estes ciclos dependem da resina presente no sistema o processo dá-se com uma subida gradual de pressão e temperatura, seguido de um estágio a valores constantes, e por fim uma descida gradual de pressão e temperatura. Na Figura 42 é representada esquematicamente o processo de moldação por autoclave.

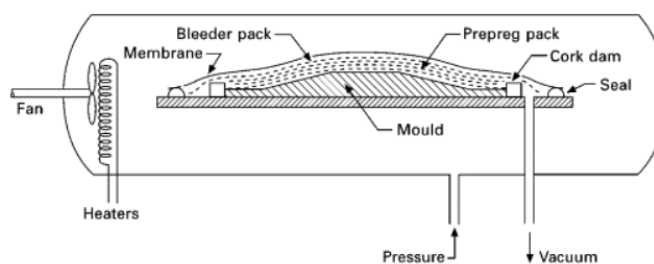


Figura 42 Representação esquemática de moldagem em autoclave [94].

Mesmo que o material de partida utilizado não seja pré-impregnado, com este método é possível obter peças com uma elevada fração volúmica de reforço. Este processo permite obter produtos finais de geometria complexa e grandes dimensões, com elevada qualidade e excelentes propriedades mecânicas (mais de 60% de fibras de carbono em peso). A moldagem em autoclave adequa-se assim a produções de pequena série. Em contrapartida, este processo requer um forte investimento inicial sendo inadequado para produção em série, devido à morosidade do processo [74].

2.5.6 Prepregs

Nos métodos de processamento de compósitos, a matriz é adicionada ao reforço de fibra durante a produção. RTM e moldagem por projeção são exemplos disso. Por outro lado, é possível ter compósitos em que as fibras já estão impregnadas para que depois seja só necessário realizar o processo de cura. A estes materiais dá-se o nome de pré-impregnados, que são também designados como semi-produtos.

Um tipo de pré-impregnado utilizado para obter peças com elevado desempenho é designado como *prepreg*. Os *prepregs* baseados em resinas termoendurecíveis, implicam um processo de cura que requer calor e pressão. Para garantir a *shelf-life* o *prepreg* é armazenado a temperaturas baixas.

Os primeiros *prepregs*, produzidos nos anos 60, necessitavam de elevadas temperaturas durante a cura e o seu *shelf-life* era muito reduzido, atualmente os *prepregs* tem um *shelf-life* de meses, e a sua temperatura de cura pode variar entre os 50° C e os 200°C.

Geralmente os *prepregs* são constituídos por resinas de epóxido e fibras de vidro, carbono ou aramida, por vezes outros materiais podem ser utilizados como matriz, tais como resinas de alta temperatura.

Um material pré-impregnado combina essencialmente as propriedades do reforço fibra, geralmente na forma de tecido, com uma matriz de resina de alto desempenho. As principais vantagens são:

- Elevada fração volúmica de fibra;
- Variabilidade mínima;
- Facilidade de cortar com precisão, por métodos manuais ou automatizados;

- Boa aderência para permitir que as camadas permaneçam no lugar durante o empilhamento e processamento;
- As camadas mantêm sua forma e podem ser colocadas com precisão.

As principais desvantagens dos *prepregs* são a necessidade de serem armazenados sobre condições específicas de temperatura e o custo deste tipo de material.

Os *prepregs* tradicionalmente são processados em autoclave, mas com os produtos mais recentes é possível realizar o seu processamento em condições menos exigentes, desde que se atinja a pressão de uma atmosfera e a temperatura de cura (superior a 50°C). Embora o custo inicial do *prepreg* seja sensivelmente o dobro comparativamente à aquisição de reforço de fibra e da resina em separado, o facto de o seu processamento ser mais fácil e se conseguir uma percentagem de fibras e resina mais uniforme comparativamente a outros processos traz vantagens de qualidade das peças.

No processo de produção de *prepregs* com resinas termoendurecíveis as fibras encontram-se enroladas em bobines e a resina num reservatório aquecido. De seguida dois rolos aquecidos tracionam as fibras, num processo designado por calandragem, onde são pressionadas entre duas folhas. Uma folha de papel é coberta com resina numa face, e a segunda folha de papel ajuda a desmoldar o *prepreg* da bobine, e garantir que o *prepreg* não fica colado no segundo rolo. De seguida, com recurso a uma lâmina a resina é distribuída, criando um filme uniforme em largura e espessura. Devido ao calor e pressão aplicados pelos rolos as fibras são impregnadas com resina e ocorre o processo de pré-cura, por fim o *prepreg* é armazenado sobre a forma de bobines [74, 95, 96]. Na Figura 43 é representado esquematicamente a produção de *prepreg*.

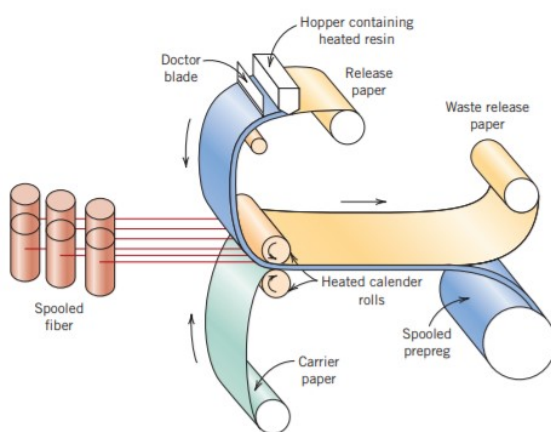


Figura 43 Representação esquemática da produção de *prepreg* [97].

2.5.7 Particularidades na ligação adesiva de materiais compósitos

Inúmeras vezes a obtenção do produto final só é alcançável recorrendo à ligação de várias peças, e por vezes os materiais são de diferentes tipos. As ligações entre materiais

compósitos muitas vezes são evitadas devido ao seu elevado custo e à sua elevada complexidade. A ligação de materiais compósitos implica muitas vezes a interrupção das fibras, o que consequentemente leva a que as tensões instaladas tenham de ser transmitidas através da ligação. Existem vários tipos de ligação e a sua escolha deve ter por base critérios como o fato da ligação ser permanente, se o material compósito na altura da ligação se encontra curado ou não, entre outros [78].

O processo de obtenção de uma ligação adesiva consiste em unir dois materiais, em que as faces estão dispostas a uma distância muito curta, de seguida o adesivo, que regra geral é de origem polimérica, é introduzido no espaço entre os dois materiais, ligando-os geralmente de forma permanente. Os adesivos com mais relevância na engenharia são designados de adesivos estruturais e têm como principal característica a sua capacidade em criar uma união com muito boas propriedades mecânicas [77].

O método de aplicação deste tipo de uniões consiste em duas etapas: a preparação das superfícies e a aplicação do adesivo. A preparação das superfícies é uma etapa preponderante na qualidade da ligação, uma vez que liga o material ao adesivo, e regra geral a limpeza das superfícies não é suficiente, sendo necessário recorrer a processos como a granalhagem ou escovagem para aumentar a rugosidade da superfície, a fim de promover uma melhor adesão entre o material e o adesivo. No caso do material a unir ser plástico o tratamento superficial pode ser realizado através do uso de solventes ou de ataque químico. Na Tabela 11 são demonstrados os principais métodos de aplicação de adesivos.

Tabela 11 Métodos de aplicação [77].

Método de aplicação	Descrição
Espátula	Método manual. As camadas não ficam regulares.
Por pistola	Utilizando uma pistola de pressão manual, mais consistente e controlado que a espátula.
Rolos manuais	Semelhante aos rolos de pintura, onde se aplica sob uma superfície lisa.
Spray	Aplicação rápida para áreas grandes ou para zonas de difícil acesso.
Aplicadores automáticos	Para produções a média ou alta velocidade, recorrendo a <i>dispensers</i> e <i>nozzles</i> .
Aplicação por rolo	Processo mecanizado, em que um rolo em rotação é parcialmente submerso num tanque com um adesivo líquido. Sendo este, posteriormente, transferido para a superfície do aderente. Utilizado para aplicar o adesivo em madeira, compósitos de madeira e materiais similares com grandes áreas de superfície.

2.6 Modificação de adesivos

A modificação de adesivos tem como objetivo aprimorar ou dotar os adesivos de propriedades fundamentais para o bom funcionamento da ligação adesiva. A modificação pode ocorrer de várias formas quer seja pela aditivação de partículas, mistura com compostos orgânicos, adição de elementos químicos, entre outros.

2.6.1 Aditivação por partículas

A aditivação por partículas consiste na adição de partículas ao adesivo. Existem vários tipos de partículas, e recorre-se a este procedimento quando se pretende melhorar ou conferir novas propriedades ao adesivo. Os tipos de partículas abordadas neste subcapítulo são as orgânicas e as minerais.

2.6.1.1 Partículas minerais

Existem vários tipos de partículas minerais que são utilizadas consoante o propósito do adesivo. No trabalho de Sadigh et al. [98] a adição de óxido de grafeno reduzido levou a uma diminuição da propagação de fendas e retardou o seu aparecimento. Num trabalho de Sun et al. [99] a utilização de reforço de nanopartículas de aramida numa junta híbrida de CFRP e alumínio levou a aumento da tenacidade de 10,43 J/m² para 335 J/m², no trabalho de Kinloch et al. [100] a adição de partículas de sílica a um adesivo epóxico resultou num aumento de tenacidade comparativamente com uma resina epóxida.

Num trabalho de Jung et al. [101] foram adicionados a um adesivo de epóxico de nanopartículas de fibra de vidro através de eletrodeposição, nanopartículas negro de carbono (ou fumo) e nanotubos de carbono multicamadas. Embora a sua adição não melhorasse nenhuma característica mecânica do adesivo, a incorporação destes materiais levou a um aumento da sua capacidade em absorver vibrações.

Um trabalho de Razavi et al. [102] analisou o comportamento mecânico do adesivo de epóxico *Araldite*® 2015, reforçado com fibras de aço inoxidável austenítico Forta 304/4301 com diâmetro de 0,5 mm. Foi possível concluir que comparativamente à utilização do adesivo epóxico sem qualquer tipo de reforço observou-se maior resistência à fadiga e que à medida que a distância entre as fibras do reforço diminuiu essa resistência aumenta.

Um trabalho de Rosso et al. [103] analisou a adição de nanopartículas de sílica ao adesivo de epóxico *Araldite*®-F, e os resultados indicaram que a sua incorporação levaram a aumentos do módulo de elasticidade em 20%, da tenacidade à fratura do novo adesivo em 140%, e da ductilidade do adesivo.

Num estudo de Kowalczyk et al. [104] foi analisada a influencia da modificação de um adesivo constituído por um copolímero de acrilato de epóxico e uma resina de epóxico

modificada através da adição de nanoargilas (*wollastenite* e *halloysite*), e foi possível concluir que a inclusão destas nanopartículas minerais levaram a uma diminuição da concentração de tensões de corte na junta, 22% com *wollastenite* e 6% com *halloysite*. Também conferiu um aumento de resistência à propagação de fendas e melhoria das suas propriedades mecânicas das juntas quando foram sujeitas a testes de envelhecimento a resistência à tensão de corte 100 % no teste de envelhecimento térmico, 85% numa câmara climática, e 27% quando imerso em combustível.

2.6.1.2 *Partículas orgânicas*

Devido à crescente preocupação com o meio ambiente tem existido uma procura para substituir fibras sintéticas por fibras naturais, e a sua utilização abrange cada vez mais áreas, sendo já possível encontrar este tipo de fibras em aplicações estruturais [105].

Delzendehrooy et al. [106] mostraram que as fibras da palmeira podem melhorar a resistência das juntas adesivas, absorvendo a energia, diminuindo a propagação de fendas.

No trabalho de Fernandes et al. [107] a adição de partículas cortiça no adesivo levou a um aumento de 32 % de G_{Ic} . Santosh et al. [108] estudaram a diferença das propriedades mecânicas de compósitos com fibras de banana e resina de vinil - éster, de resina de epóxico. Foi possível concluir que o compósito de resina de epóxico reforçada com fibras de banana apresenta maiores resistências ao impacto, flexão e tração, em comparação com o de resina de vinil – éster

As propriedades mecânicas de compósitos reforçados com fibra de juta e matrizes de resinas de poliéster e de epóxico foram alvo de estudo por Gopinath et al. [109]. Foi possível descobrir que os compósitos de resina de epóxico e juta obtiveram propriedades superiores à tração e à flexão. No entanto, o tempo de processamento necessário para o compósito de resina de epóxico e juta é muito maior que o compósito de poliéster e juta. Os autores também mencionaram que os compósitos de resina de epóxico e juta são mais adequadas para aplicações na indústria automóvel em vez de compósitos resina de poliéster e juta. O trabalho de Barbosa et al. [110] refere que a utilização de micropartículas de cortiça conferiu ao adesivo maior ductilidade, comparativamente ao adesivo sem partículas.

No trabalho de Kanakannavar et al [111] foram comparadas as propriedades mecânicas de compósitos de fibra de vidro e fibra de algodão, e uma resina de epóxico. O reforço com fibras de algodão conferiu ao adesivo um aumento da tenacidade à fratura nos modos I e II, de 43% e 60% respetivamente, comparativamente ao adesivo reforçado com fibra de vidro.

No trabalho de Silva et al. [112] foram estudadas as características de um adesivo reforçado com fibra de banana e sílica, e foi possível concluir que a utilização de fibras

de banana levou a aumentos da resistência à tração e módulo de elasticidade. Por sua vez, a adição de sílica ao adesivo provocou um aumento de porosidade não promovendo nenhuma melhoria nas características mecânicas do adesivo.

2.6.2 Utilização de filmes de *prepreg*

A utilização de filmes *prepreg* como elemento adesivo tem como principais aplicações a reparação de materiais compósitos. No trabalho de Guoquiang et al. [113], a comparação de adesivos de pré-impregnado de fibra de vidro com adesivos não reforçados, mostra que a resistência à tração dos adesivos pré-impregnados é consideravelmente superior quando comparado com os adesivos sem qualquer reforço. A orientação das fibras tem também um papel preponderante nas propriedades mecânicas. No estudo de Bhatia et al. [114] foi analisada a utilização de um *prepreg* de CFRP em várias orientações, como um remendo, e foi possível concluir que o remendo que apresentava as fibras orientadas a 0° apresentava maior resistência à tração e que o remendo com as fibras orientadas a 45° apresentava maior deformação.

No trabalho de Brugo et al. [115] foi analisado um *prepreg* de resina de epóxico e partículas nanocarbono comparativamente à resina de epóxico. Os resultados obtidos indicam que embora a resistência à fratura não tenha sofrido qualquer alteração a resistência à propagação de fendas aumentou consideravelmente.

No trabalho de Shang et al. [116] a utilização de um *prepreg* de CFRP sobre a forma de malha na camada em contacto com o adesivo demonstrou ser uma forma eficiente de diminuir as tensões de arrancamento na junta aumentando assim consideravelmente a sua resistência.

2.6.3 Outros aditivos e compósitos modificados

A adição de partículas em adesivos tem como objetivos a melhoria das suas propriedades quando a ligação com o adesivo não é suficiente para os requisitos exigidos, ou quando é necessário que a ligação adesiva apresente propriedades que de outra forma não seriam possíveis obter.

Um trabalho de Boyd et al. [117] analisou a utilização de um filme termoplástico de poliuretano interlaminar, numa resina de epóxico com fibra de vidro, o poliuretano levou a um aumento da resistência à delaminação em ensaios de baixa velocidade, bem como a um aumento da rigidez do compósito.

No trabalho de Kowalczyk et al [118] foi estudada a adição de uma base de fósforo do monómero de metacrilato a um adesivo estrutural à base de acrilato de epóxico, através de irradiação de raios UV sobre o adesivo. A adição do metacrilato levou a uma maior adesão entre o adesivo e o substrato de alumínio, verificando-se também que os níveis de radiação aplicados durante a cura eram preponderantes nas propriedades do adesivo

com aditivo. A introdução de metacrilato levou também a um aumento da resistência ao corte.

A adição de diferentes tipo de catalisadores nos adesivos também pode levar ao aumento de certas propriedades mecânicas. No trabalho de Feng et al [118] a utilização de AlF_3 como estabilizador na cura de um adesivo de alta temperatura, à base de epóxido/silicone, promoveu um aumento de filamentos, devido à reação do AlF_3 com a resina, provocados por oxidação, levando a um aumento de 80% de resistência à tração do adesivo.

A adição de partículas aos adesivos pode ter as mais diversas finalidades, e no trabalho de Barus et al [119] a introdução de nitreto de boro numa ligação adesiva de CFRP permite uma melhor percepção dos defeitos da ligação adesiva, uma vez que preenchem as fendas, tornando mais fácil a sua percepção na inspeção visual, sem comprometer as propriedades mecânicas da junta.

DESENVOLVIMENTO

3 DESENVOLVIMENTO

O objetivo desta dissertação é estudar o comportamento, quando sujeito ao esforço de tração, de juntas de sobreposição simples unidas através pré impregnado. De seguida apresentam-se as curvas $P-\delta$ experimentais, variando o tipo de substrato, o tipo de adesivo e a orientação, e são analisados os resultados obtidos. Por fim, são utilizados modelos numéricos para replicar os resultados obtidos experimentalmente.

3.1 Trabalho experimental

3.1.1 Materiais utilizados

Neste capítulo são apresentados detalhadamente todos os materiais utilizados na realização do trabalho experimental, nomeadamente os materiais adesivos e os substratos.

3.1.2 Aderentes

Os aderentes, também designados como substratos, são os elementos a ser unidos pela ligação adesiva. Os aderentes utilizados foram uma liga alumínio, pré-impregnado de fibra de carbono e de vidro. A liga de alumínio utilizada é a Al6082-T651. Esta resulta do envelhecimento artificial a uma temperatura de 180°. Devido à sua ampla utilização para fins estruturais optou-se por esta liga para substrato. Esta liga foi anteriormente caracterizada no trabalho de Campilho et al. [120] e as suas propriedades encontram-se representadas Tabela 12.

Tabela 12 Propriedades mecânicas do Al6082-T651 [120]

Propriedades	Valor
Módulo de Young, E [GPa]	70,07±0,83
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	261,67±7,60
Resistência à tração, σ_f [MPa]	324,00±0,16
Deformação de rotura, ϵ_f [%]	21,70±4,24

O *pregreg* de fibras de carbono utilizado tem a designação comercial de *UD REM TAPE –12KT700 Carbon Fiber* e as propriedades são determinadas através da norma ASTM D-3039 [121] e apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 Propriedades do *pregreg UD REM TAPE –12KT700 Carbon Fiber*

Propriedades	Valor
Resistência à tração, σ_f [MPa]	2860
Módulo de Young, E [GPa]	134
Deformação de rotura, ϵ_f [%]	2,02
Resistência ao corte [MPa]	136
Resistência à tração a 90° [MPa]	81
Tenacidade à tração [J/m ²]	800

O *pregreg* de fibra de vidro utilizado no trabalho experimental apresentado na Tabela 14 e tem a designação comercial de *E-761 Epoxy prepeg 120 E-Glass*.

Tabela 14 Propriedades do *pregreg* de fibra de vidro *E-761 Epoxy prepeg 120 E-Glass*. [122]

Propriedades	Valor
Resistência à tração, σ_f [MPa]	1080
Módulo de Young, E [GPa]	39
Deformação de rotura, ϵ_f [%]	28%
Resistência ao corte [MPa]	89
Resistência à tração a 90° [MPa]	1080
Tenacidade à fratura [J/m ²]	600

3.1.3 Materiais adesivos

Os materiais adesivos utilizados são *prepreg* de fibra de carbono e *prepreg* de fibra de vidro, em que se consideram diferentes orientações das fibras. As propriedades dos materiais adesivos foram obtidas com recurso ao *software* Helius®. Na Tabela 15 são apresentadas as propriedades mecânicas dos *prepregs* utilizados como material adesivo. As orientações analisadas neste trabalho são 0°, 90° e +/- 45° para fibras de carbono, com duas camadas, para as fibras de vidro as orientações analisadas foram 0°/90° e +/- 45°, constituídas por uma camada.

Tabela 15 Propriedades dos materiais adesivos

Características	CFRP (00) ₂	CFRP (+/-45) ₂	CFRP (90) ₂	GFRP (+/-45) ₁	GFRP (0/90) ₁
E_1 (MPa)	1,23E+05	1,68E+04	8,30E+03	1,65E+04	2,88E+04
E_2 (MPa)	8,30E+03	1,68E+04	1,23E+05	1,65E+04	2,88E+04
E_3 (MPa)	8,30E+03	1,01E+04	8,30E+03	1,31E+04	1,31E+04
G_1 (MPa)	4,80E+03	3,18E+04	4,80E+03	1,28E+04	5,52E+03
G_2 (MPa)	4,80E+03	3,82E+03	2,84E+03	4,56E+03	4,56E+03
G_3 (MPa)	2,84E+03	3,82E+03	4,80E+03	4,56E+03	4,56E+03
ν_{12}	0,3	0,75	0,02	0,5	0,12
ν_{13}	0,02	0,11	0,46	0,2	0,34
ν_{23}	0,46	0,67	0,3	0,16	0,16

3.1.4 Geometria das juntas

Na Figura 44 estão representadas todas as dimensões bem como a geometria das JSS, em que L_T é o comprimento total dos provetes, t_s é a espessura do substrato, t_A é a espessura do material adesivo, L_O é o comprimento de sobreposição, L_C é o comprimento dos calços, L_{UP} é o comprimento entre calços e b a largura do substrato.

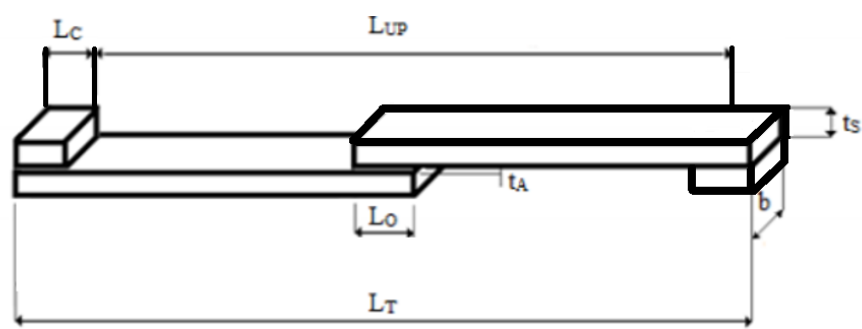


Figura 44 Geometria dos provetes de JSS

Na Tabela 16 são apresentadas as dimensões dos provetes utilizados.

Tabela 16 Dimensões dos provetes

Comprimento de sobreposição (L_o)	25		
Largura (b)	25	15	10
Espessura dos substratos (t_s)	2		
Comprimento entre calços (L_{UP})	200		
Comprimento total dos provetes (L_T)	255		
Espessura dos materiais adesivos (t_A)	0,2		

mm

3.1.5 Processo de fabrico

Sendo os substratos de diferentes origens, o processo de fabrico das juntas também foi diferente. Como tal, este subcapítulo foi está dividido em dois subcapítulos. No primeiro é explicado todo o processo de produção uma junta com substrato de alumínio. No segundo, são detalhados os procedimentos da produção das juntas com substrato de *prepreg*.

3.1.5.1 Produção das juntas

Uma vez que os substratos já estavam previamente cortados, com as dimensões corretas, o passo seguinte foi fazer o tratamento superficial de granalhagem ao substrato (Figura 45).



Figura 45 Tratamento superficial de granalhagem

De seguida foram removidos todos os resíduos das superfícies a ser unidas (Figura 46), através de limpeza manual com acetona.



Figura 46 Limpeza dos substratos.

De seguida foram cortadas tiras de material adesivo, que foram posicionadas e curadas numa prensa de pratos quentes (Figura 47). Para ajudar a que o material adesivo seja uniforme ao longo da área a ser ligada e sofresse uma pressão uniforme, foram utilizadas placas de alumínio para anular os desfasamentos de altura das juntas. Para

impedir a adesão das juntas às placas de alumínio aos pratos da prensa, devido ao excesso de resina que se liberta durante o processo de cura, foi utilizado uma película desmoldante de *Teflon*.

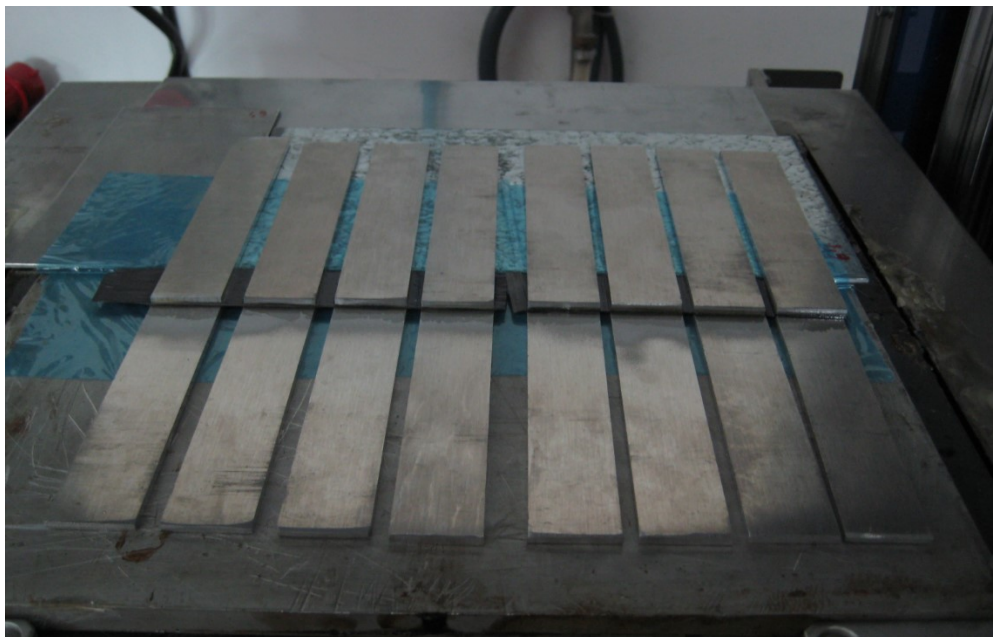


Figura 47 Posicionamento do material e dos substratos na prensa de pratos quentes.

O estágio de cura utilizado para a produção das juntas é apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 Parâmetros de cura das juntas.

Temperatura (°C)	Força (ton/m ²)	Tempo (min)
25	0	1
35	0	4
65	0	12
95	1	12
125	5	12
125	5	30
65	5	60

Após a cura das juntas procedeu-se ao corte do material adesivo que unia as várias juntas, recorrendo à máquina de corte do laboratório de Engenharia Mecânica do ISEP (Figura 48).



Figura 48 Máquina de corte.

De seguida foram removidos os excessos das juntas adesivas com recurso a uma lima (Figura 49).

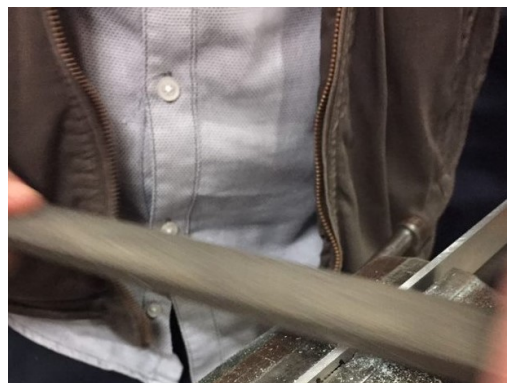


Figura 49 Remoção do material adesivo em excesso.

A última etapa na produção das juntas consistiu em colar calços nas extremidades das juntas para garantir o seu correto alinhamento, durante o ensaio de tração. De seguida com ajuda de um alicate foram removidos os excessos dos adesivos. Para colar os calços, foi utilizado o adesivo *Araldite 2015*®.

3.1.5.2 Substrato de prepreg

Na produção dos substratos de CFRP o empilhamento dos utilizado foi 16 camadas empilhadas a (0°) e a espessura média obtida foi de 2,5 mm. Para a produção dos substratos de GFRP foram empilhadas 16 camadas, com uma sequência de empilhamento (0°/90°) em que a espessura média obtida foi de 2,5 mm. De seguida realizou-se o processo de cura e os parâmetros são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 Parâmetros de cura do substrato.

Temperatura (°C)	Força (ton/m ²)	Tempo (min)
25	0	1
35	1	1
65	3	4
95	5	10
125	5	60
125	2	15
65	1	5

Pelo processo descrito, foi possível obter uma placa de 200 x 300 mm², que foi de seguida cortada em provetes com 15 mm de espessura com o auxílio da máquina de corte com disco, ilustrada Figura 50, e que se encontra no laboratório do DEM.



Figura 50 Corte de uma placa de GFRP em substratos de 15 mm de largura.

Por fim, o tratamento superficial nas superfícies a ser unidas foi realizado com recurso a uma lixa com uma granulometria de 180 a fim de promover a adesão. A Figura 51 ilustra JSS com substrato de GFRP.

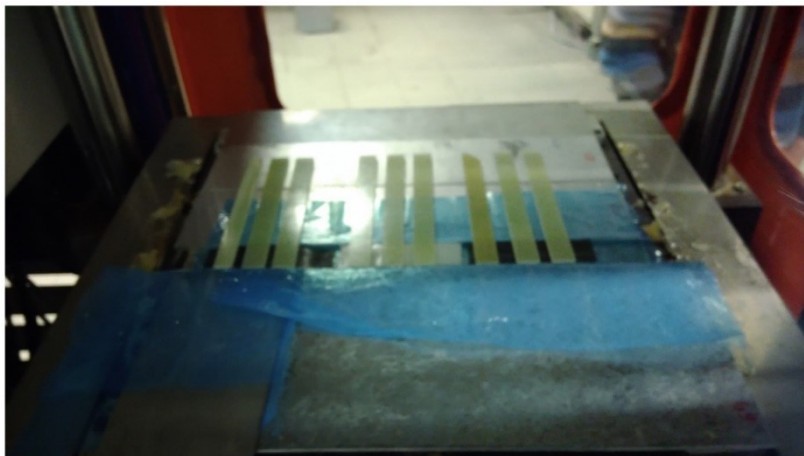


Figura 51 JSS com substrato de GFRP, com material adesivo CFRP orientado a 90° , a 0° , e GFRP com as fibras orientadas a $\pm 45^\circ$

As restantes etapas do processo de produção das juntas de *prepreg* são idênticas ao processo de produção das juntas com substrato de alumínio.

3.1.6 Ensaios

A realização dos ensaios de tração das juntas teve lugar no LEM do ISEP. Para o efeito recorreu-se a uma máquina servo-hidráulica universal modelo AG-X da marca SHIMADZU Autograph®, equipada com uma célula de carga de 100 kN, para conseguir retirar os dados provenientes dos ensaios de tração a máquina encontra-se conectada a um computador com o *software* TRAPEZIUM X®, que permita obter os resultados do ensaio em formato MS Excel®, da força e do deslocamento. Na Figura 52 é possível visualizar a máquina utilizada nos ensaios.



Figura 52 Máquina de ensaio de tração SHIMADZU Autograph®.

Os ensaios de tração foram realizados a uma velocidade de solitação de 2 m/s. Na Figura 53 é ilustrado um ensaio de uma JSS constituída por substrato de GFRP e material adesivo de CFRP com a as fibras orientadas a 90°.

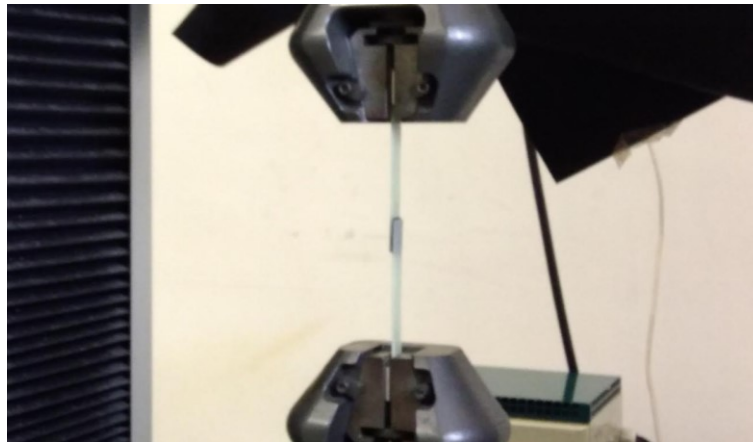


Figura 53 Ensaio de tração

3.1.7 Resultados obtidos

No presente subcapítulo são abordadas as curvas $P-\delta$, os modos de rotura e a resistência das juntas, segundo os diferentes tipos de substrato, bem como segundo os diferentes tipos de material adesivo.

3.1.7.1 Curvas $P-\delta$

Neste subcapítulo estão representadas graficamente as curvas $P-\delta$ obtidas separadamente por tipo de substrato e tipo de adesivo. Na Figura 54 é utilizado substrato de GFRP e como material adesivo duas camadas unidireccionais de CFRP com a orientação de 0°. Neste estudo o provete 3 não foi considerado para efeitos de caracterização mecânica da junta, uma vez que o valor apresentado é bastante díspar quando comparado com os resultados obtidos nos restantes provetes.

Verifica-se um comportamento linear na maior parte do teste, e na zona final é perceptível uma progressiva diminuição de rigidez até à rotura. Observam-se magnitudes de resultados diferentes, apresentando o ensaio 3 uma resistência consideravelmente inferior. Algumas diferenças na rigidez elástica das juntas podem ser atribuídas a fenómenos como questões de amarração dos provetes.

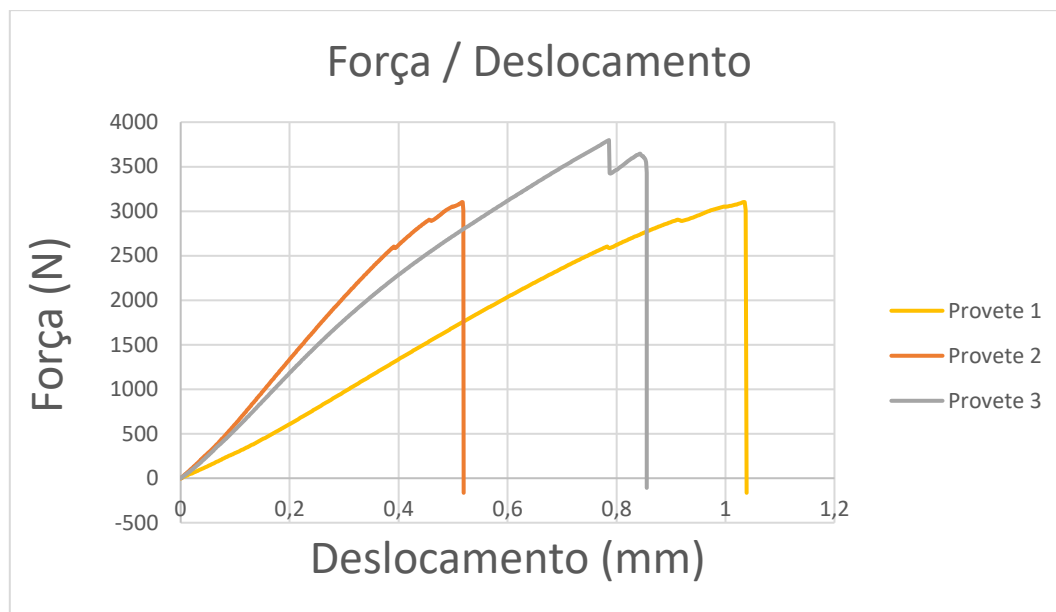


Figura 54 Curvas $P-\delta$ para as juntas de substrato GFRP, adesivo CFRP com orientação 0°

Na Figura 55 é utilizado substrato de GFRP e como material adesivo duas camadas unidirecionais de CFRP com a orientação de 90°. Neste caso foi necessário excluir o ensaio 1 valor uma vez que apresenta um resultado muito inferior aos restantes.

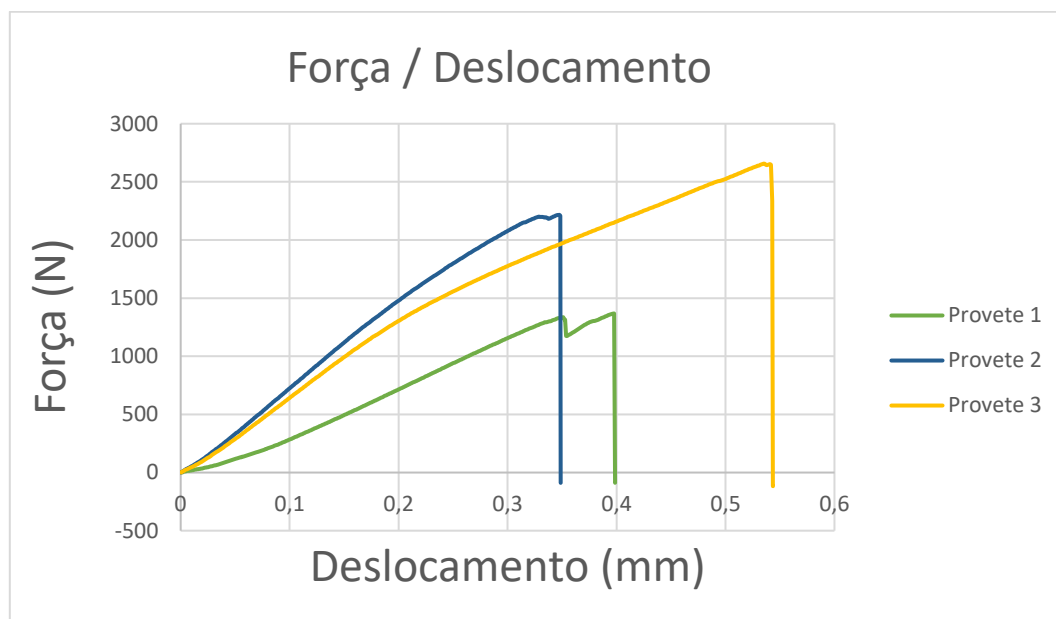


Figura 55 Curvas $P-\delta$ para as juntas de substrato GFRP, adesivo CFRP com orientação 90°

É possível observar um comportamento tendencialmente linear até à rotura. As oscilações na rigidez elástica ocorrem devido a limitações associadas à amarração dos provetes. De salientar a discrepância de valores obtidos entre o ensaio 1 e os restantes.

Na Figura 56 é utilizado substrato de GFRP, e como material adesivo, uma camada bidirecional de GFRP com a orientação de +/- 45°. Neste estudo o provete 1 não foi

considerado para efeitos de caracterização mecânica da junta, uma vez que o valor obtido é muito menor quando comparado com os resultados obtidos nos restantes provetes.

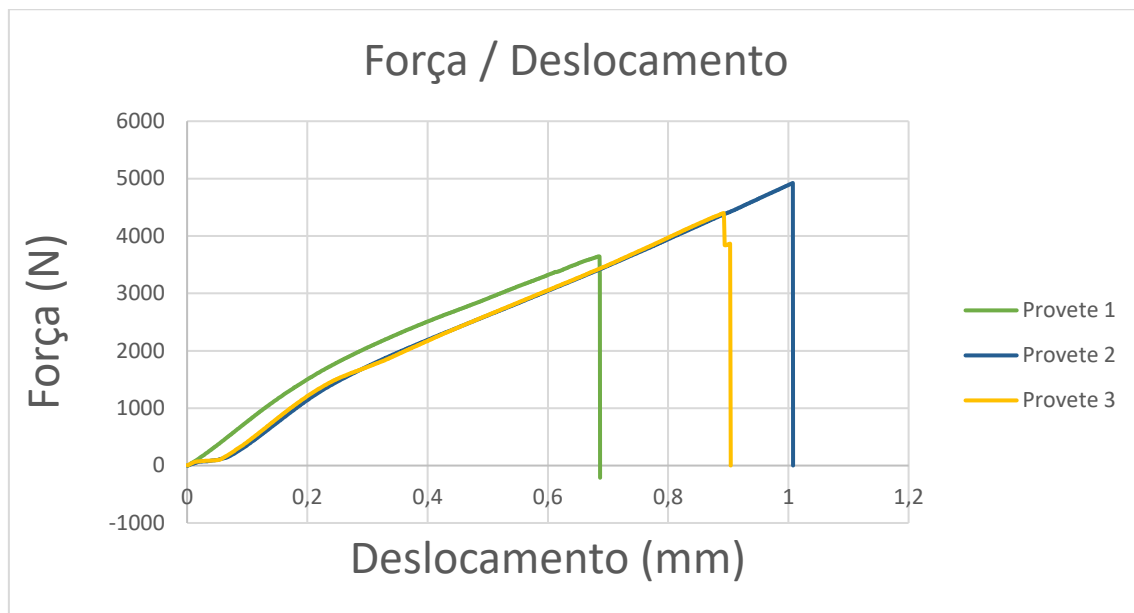


Figura 56 Curvas $P-\delta$ para as juntas de substrato GFRP, adesivo GFRP com orientação $\pm 45^\circ$

É possível observar duas regiões com comportamento linear, e com valores de rigidez distintas. Registam-se pequenas oscilações que podem ser atribuídas a problemáticas relacionadas com a amarração dos provetes. O resultado obtido com o ensaio 1 é relativamente inferior aos restantes.

Os resultados obtidos com substrato de CFRP encontram-se representados na Figura 57 e Figura 58. Na Figura 57 é utilizado substrato de CFRP e como material adesivo uma camada bidirecional de GFRP com a orientação de ± 45 . Neste estudo foram incluídos todos os casos, para uma melhor caracterização da resistência das juntas.

Observa-se um comportamento quase linear das juntas 2 e 3, até à rotura, e no caso da junta o comportamento é inicialmente linear seguindo-se uma acentuada diminuição de rigidez, acompanhada de uma capacidade de deformação não observada nas restantes juntas. Regista-se pequenas oscilações na rigidez elástica da junta devido à flexibilidade dos componentes da máquina de ensaios, e problemas relacionados com a amarração das juntas. De salientar a diferença de valores quer de força máxima, mas sobretudo de deslocamento do ensaio 1 relativamente aos restantes. Isto poderá ser explicado por uma muito melhor preparação da superfície de adesão no caso da junta 1.

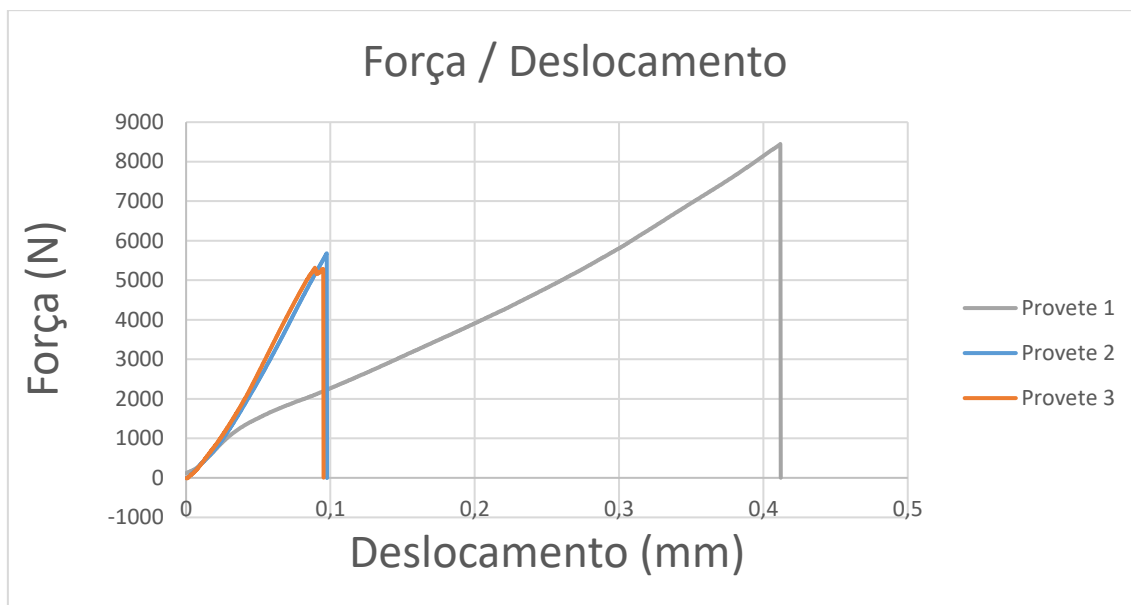


Figura 57 Curvas $P-\delta$ para as juntas de substrato CFRP, adesivo GFRP com orientação $\pm 45^\circ$

Na Figura 58 é utilizado substrato de CFRP e como material adesivo duas camadas unidirecionais de CFRP com a orientação de 90° . Neste estudo o provete 4 não foi considerado para efeitos de caracterização mecânica da junta, visto que o resultado obtido no ensaio é muito menor quando comparado com os resultados obtidos nos restantes ensaios.

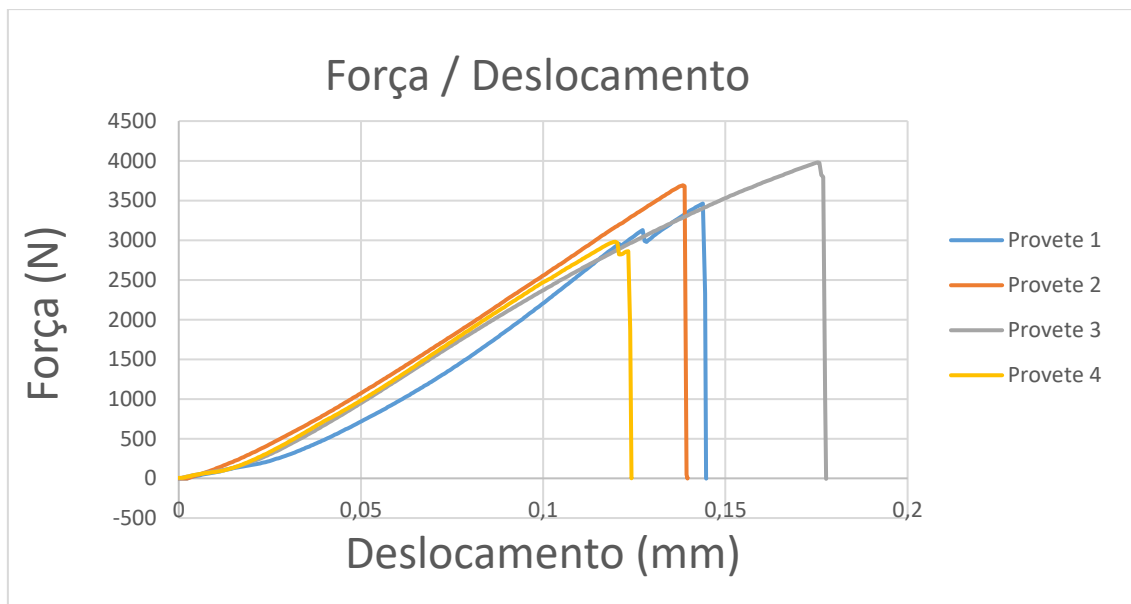


Figura 58 Curvas $P-\delta$ para as juntas de substrato CFRP, adesivo CFRP com orientação 90°

É possível verificar um comportamento elástico até à rotura em todos os ensaios, sendo registadas oscilações devido a questões relacionadas com a amarração das juntas.

Os resultados obtidos com substrato de alumínio encontram-se representados na Figura 59, Figura 60, Figura 61, Figura 62 e Figura 63. Na Figura 59 é utilizado substrato de alumínio e como material adesivo uma camada bidirecional de GFRP com a orientação de $\pm 45^\circ$.

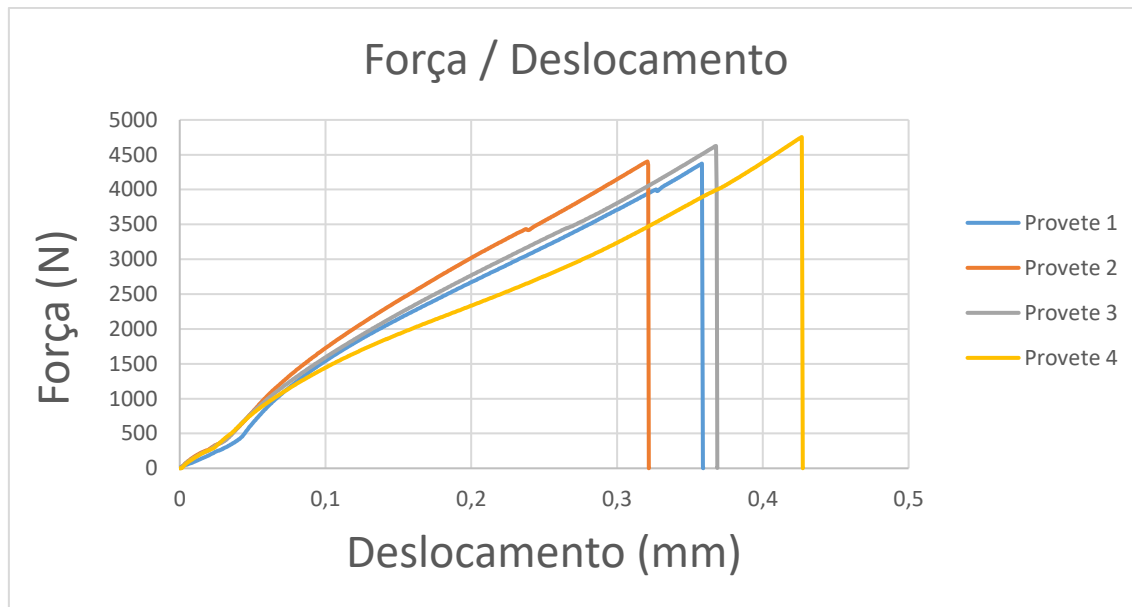


Figura 59 Curvas $P-\delta$ para as juntas de substrato alumínio, adesivo GFRP com orientação $\pm 45^\circ$

É possível observar um comportamento linear de todas as juntas ensaiadas. As oscilações observadas têm como principal motivo a deficiente amarração das juntas. Na Figura 60 é utilizado substrato de alumínio e como material adesivo uma camada bidirecional de GFRP com a orientação de $0/90^\circ$. Neste estudo todos os ensaios foram contabilizados, visto que os valores obtidos são muito idênticos.

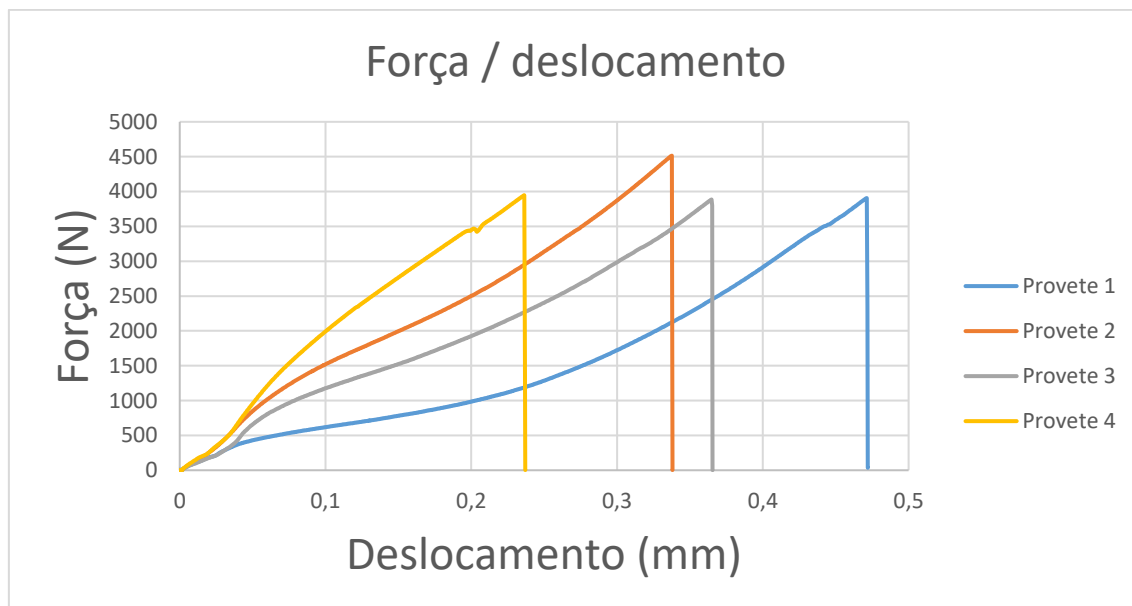


Figura 60 Curvas $P-\delta$ para as juntas de substrato alumínio, adesivo GFRP com orientação $0/90^\circ$

Verifica-se um comportamento linear das juntas até à rotura. valor deslocamento das juntas é muito diferente devido à flexibilidade da máquina, mas sobretudo a questões relacionadas com a amarração das juntas.

Na Figura 61 é utilizado substrato de alumínio e como material adesivo duas camadas unidirecional de CFRP com a orientação de 0° . Visto que os resultados obtidos neste estudo foram bastante dispares, os provetes 1 e 3 não foram considerados para análise.

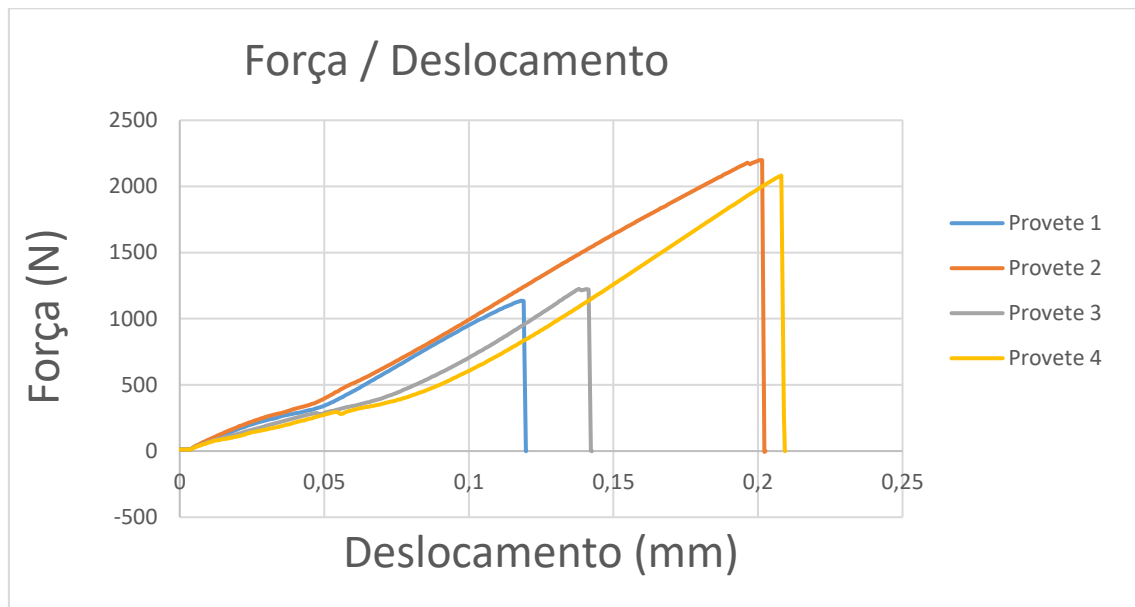


Figura 61 Curvas $P-\delta$ para as juntas de substrato alumínio, adesivo CFRP com orientação 0°

É possível identificar uma discrepância de valores de força e deslocamento máximo atingidos. O comportamento é linear até à rotura. As oscilações ocorrem devido a problemas de amarração das juntas.

Na Figura 62 é utilizado substrato de alumínio e como material adesivo duas camadas unidirecional de CFRP com a orientação de $\pm 45^\circ$. Neste estudo as juntas 3 e 4 não foram consideradas para efeitos de caracterização mecânica, visto apresentarem valores bastante dispares dos valores obtidos nas juntas 1 e 2.

É possível observar uma discrepância entre o comportamento, deformação e força máxima neste ensaio, onde apenas o provete 1 apresenta um comportamento elástico até à rotura, estes resultados só são justificáveis com uma deficiente preparação das restantes juntas.

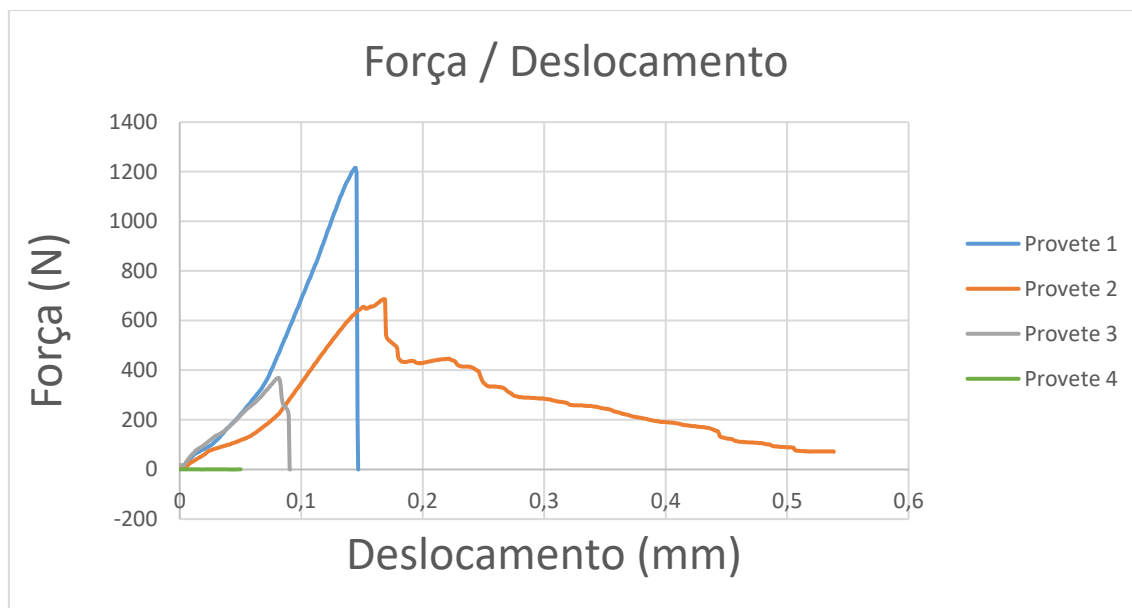


Figura 62 Curvas $P-\delta$ para as juntas de substrato alumínio, adesivo CFRP com orientação $\pm 45^\circ$

Na Figura 63 é utilizado substrato de alumínio e como material adesivo duas camadas unidirecional de CFRP com a orientação de 90° . Neste caso a junta número 1 não foi considerado para efeitos de caracterização mecânica da junta, uma vez que apresenta um valor de resistência à tração muito inferior às resistências das restantes juntas.

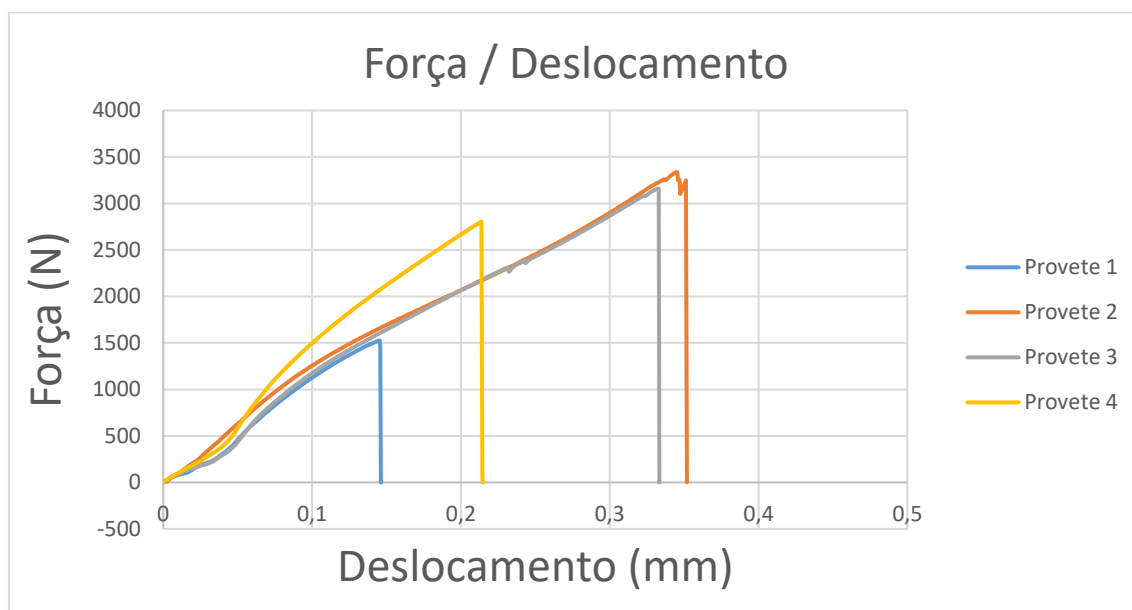


Figura 63 Curvas $P-\delta$ para as juntas de substrato alumínio, adesivo CFRP com orientação 90°

É possível verificar um comportamento tendencialmente linear até à rotura, mas com uma grande variação de valores de deformação e força máxima atingidas. A discrepância de valores de deformação poderá em parte ser atribuída a diferentes graus de qualidade na preparação da superfície. Outras pequenas diferenças poderão ser devido a questões de amarração e deficiente fabrico das juntas.

3.1.7.2 Modos de rotura

Para proceder a uma correta análise da resistência das juntas é necessário analisar previamente os modos de rotura, uma vez que a rotura indica se a junta foi bem preparada, e se a resistência que o adesivo confere à junta foi utilizado, na sua totalidade. Na Tabela 19 encontra-se uma descrição dos tipos de roturas observados nesta dissertação.

Tabela 19 Tipos de rotura.

Tipos de rotura	Definição	Exemplo
Coesiva (C)	Este tipo de rotura ocorre no material adesivo. É o modo de rotura ideal, uma vez que se retira total proveito da resistência do adesivo.	
Interlaminar (IL)	Este tipo de rotura caracteriza-se pela rotura laminar das camadas.	
Substrato (S)	Este tipo de rotura acontece no substrato, significando que o adesivo escolhido é mais resistente do que o substrato.	
Adesiva (A)	Este tipo de rotura ocorre na interface entre o adesivo e o substrato, e ocorre devido à má preparação das superfícies. Neste tipo de rotura não há um aproveitamento total das propriedades do adesivo e do substrato.	

Na Tabela 20 são apresentados os tipos de rotura nos provetes ensaiados nesta dissertação.

Tabela 20 Tipos de rotura nos ensaios.

Tipo de substrato/Tipo de adesivo	Modo de rotura (nº de provete)			
	1	2	3	4
AL/GFRP 0/90	IL	A	A	A
AL/GFRP +/-45	A	A	IL	A
AL/CFRP 0	A	A	A	A
AL/CFRP 90	A	A	A	A
AL/CFRP +/- 45	A	IL	A	A
CFRP/CFRP 90	C	C	C	C
CFRP/GFRP +/- 45	C	C	C	-
GFRP/CFRP 0	C	S	C	-
GFRP/CFRP 90	C	C	C	-
GFRP/GFRP +/- 45	C	C	C	-

3.1.7.3 Resistência das juntas

Neste subcapítulo são abordados os dados referentes à resistência das juntas, obtidos experimentalmente. Devido ao facto de nem todos os provetes apresentarem a mesma largura para existir uma análise correta foi necessário dividir a força máxima obtida durante o ensaio de tração F pela largura do provete B . Na Figura 64 é ilustrado um resumo dos ensaios de resistência à tração.

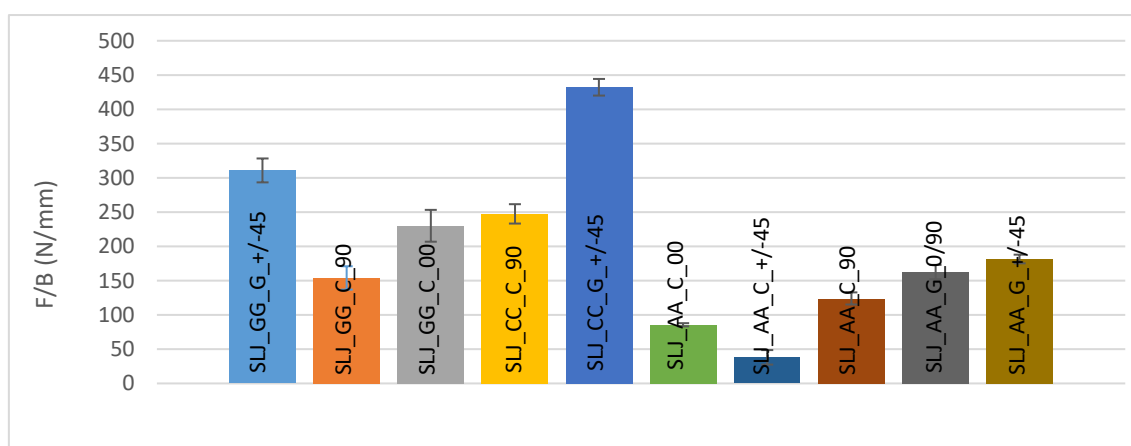


Figura 64 Resultados dos esforços de tração máxima experimentais.

3.1.8 Análise de resultados

Através da análise das curvas $P-\delta$, dos modos de rotura e da resistência das juntas, é possível verificar que, nos ensaios com substrato de alumínio, não é possível retirar o máximo proveito da ligação adesiva, uma vez que os modos de rotura são maioritariamente adesivos. O principal motivo para a obtenção destes resultados, prende-se com a fraca aderência entre o substrato e o material adesivo, o que faz com que as propriedades mecânicas das fibras, para a resistência do material adesivo compósito, não tenham desempenhado um papel de elevada preponderância na resistência das juntas. Através de uma análise quantitativa é possível determinar que o material adesivo que apresenta melhores resultados é o GFRP com as fibras orientadas a $\pm 45^\circ$, de seguida é o GFRP com as fibras orientadas a $0/90^\circ$ com uma resistência à tração correspondente a 87% do referido valor máximo. Os materiais adesivos de CFRP apresentam todos valores inferiores comparativamente aos obtidos com GFRP. Entre os sistemas com CFRP, o que apresenta melhores resultados é o com as fibras orientadas a 90° , com 60% do valor máximo de resistência à tração, atrás referido. Segue-se o CFRP com as fibras orientadas a 0° , com apenas 33% do valor máximo de resistência à tração observado, e por fim os piores resultados foram os alcançados por CFRP com as fibras orientadas a $\pm 45^\circ$.

Nos substratos de CFRP é possível observar um aumento quando comparado com os restantes tipos de substratos dos valores de resistência das juntas. Isto deve-se ao facto de as roturas observadas serem do tipo coesiva, o que faz com que a resistência do material adesivo seja mais preponderante para a resistência da junta. Neste caso é possível observar que a orientação das fibras do material adesivo tem relevância na resistência do material adesivo, uma vez que o material adesivo que apresenta melhores resultados à tração é o GFRP com as fibras orientadas a $\pm 45^\circ$, e o material adesivo CFRP com as fibras orientadas a 90° , obteve 67% do valor máximo alcançado neste tipo de substratos.

Nos substratos de GFRP os valores de rotura aumentaram substancialmente comparativamente aos obtidos com substrato de alumínio aumentaram, tendo inclusivamente uma das juntas sofrido a rotura pelo substrato. Isto deve-se ao facto de grande parte das juntas apresentar rotura do tipo coesiva, o que implica uma maior contribuição do material adesivo para a resistência global da junta. Também é possível observar que, nestas juntas, as fibras revelaram ter mais preponderância na resistência do material adesivo compósito. O material adesivo que apresenta melhor resistência à tração é o GFRP com as fibras orientadas a $\pm 45^\circ$. Segue-se o CFRP com as fibras orientadas a 0° com 49 % do valor máximo de resistência, e por fim o CFRP com as fibras orientadas a 90° , com substrato de GFRP.

Em suma é possível afirmar que o material adesivo que apresenta melhores resultados resistência à tração é o GFRP com as fibras orientadas a $\pm 45^\circ$, independentemente do

tipo de substrato. O substrato que produz juntas com maior resistência à tração, utilizando como comparação diferentes substratos com o mesmo tipo de adesivo, é o CFRP, de seguida o GFRP, e por fim o alumínio.

3.2 Trabalho numérico

Neste capítulo são abordadas as condições da análise numérica para os ensaios experimentais. Nesta dissertação o *software* utilizado foi o ABAQUS®, versão de 2017, com o objetivo de determinar as propriedades mecânicas de cada tipo de junta. Inicialmente modelou-se a geometria 2D dos provetes. Posteriormente, foram atribuídas as propriedades a cada componente da junta, substrato e adesivo, e definido cada tipo de malha. Numa fase final foram recolhidos os dados provenientes da simulação do ensaio de tração.

3.2.1 Condições da análise numérica

O modelo de dano triangular foi o escolhido dos vários tipos de modelos de dano coesivo, uma vez que é unicamente usado para modelar o comportamento de camadas finas de adesivo, com bons resultados, e utiliza poucos parâmetros para realizar a simulação.

Para conseguir correr a simulação é necessário realizar vários sequencialmente passos, que serão descritos de seguida.

1º PASSO – DESENHO 2D

Neste passo foi desenhada a junta, como é demonstrado na Figura 65. Inicialmente foi apenas desenhado o contorno exterior da junta. De seguida, este contorno foi dividido em partições para atribuir as propriedades aos diferentes materiais (substrato e adesivo). As dimensões definidas na Figura 65 variam consoante a junta.

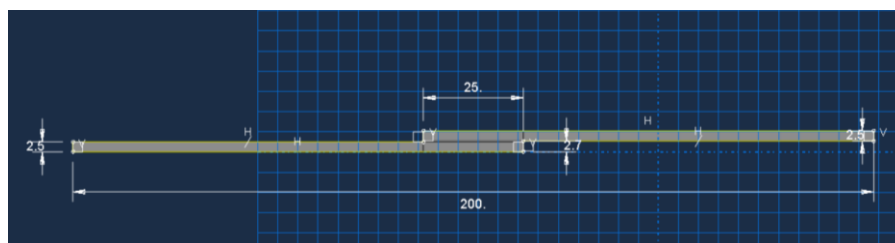


Figura 65 Desenho 2D no *software* ABAQUS®.

2º PASSO – PROPRIEDADES

Neste passo são atribuídas e definidas as propriedades de cada uma das partições. Na Tabela 21 encontra-se em síntese o material, o comportamento e as secções utilizadas nesta dissertação.

Tabela 21 Tipos de material, comportamento e tipos de secção.

Material	Comportamento	Tipo de secção
CFRP (substrato)	Mecânico - Elástico - Isotrópico	Homogéneo
Alumínio (substrato)	Mecânico - Elástico - Isotrópico	Homogéneo
GFRP (substrato)	Mecânico - Elástico - Isotrópico	Homogéneo
CFRP 0°	Mecânico - Elástico – Tração	Coesivo – Separação por tração
	Mecânico – danos por leis de separação de tração - QUADS	
CFRP 90°	Mecânico - Elástico – Tração	Coesivo – Separação por tração
	Mecânico – danos por leis de separação de tração - QUADS	
CFRP +/- 45°	Mecânico - Elástico – Tração	Coesivo – Separação por tração
	Mecânico – danos por leis de separação de tração - QUADS	
GFRP 0/90°	Mecânico - Elástico – Tração	Coesivo – Separação por tração
	Mecânico – danos por leis de separação de tração - QUADS	
GFRP +/- 45°	Mecânico - Elástico – Tração	Coesivo – Separação por tração
	Mecânico – danos por leis de separação de tração - QUADS	

De referir que, para a obtenção das distribuições de tensões, tanto de arrancamento como de corte, optou-se por alterar as propriedades do adesivo deixando de ser coesivas, para passar a ter um comportamento Mecânico - Elástico – Isotrópico e tipo de secção torna-se homogénea.

3º PASSO – STEP

Neste passo são definidos os parâmetros de computação utilizados na simulação. Na Figura 66 estão definidos os parâmetros de incrementação em análise. Como forma de facilitar a convergências durante a fase de propagação de dano, o valor mínimo admitido de tamanho de incremento (em % da solicitação aplicada) é de 1×10^{-20} e o máximo é igual ao valor inicial.

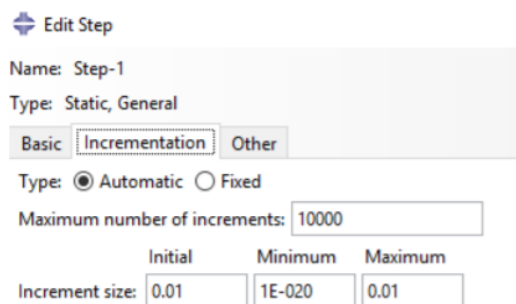


Figura 66 Definição dos incrementos em análise

4º PASSO – CARGAS

Neste passo são distribuídos os pontos de encastre bem como os pontos onde as cargas vão atuar, como é possível visualizar na Figura 67.

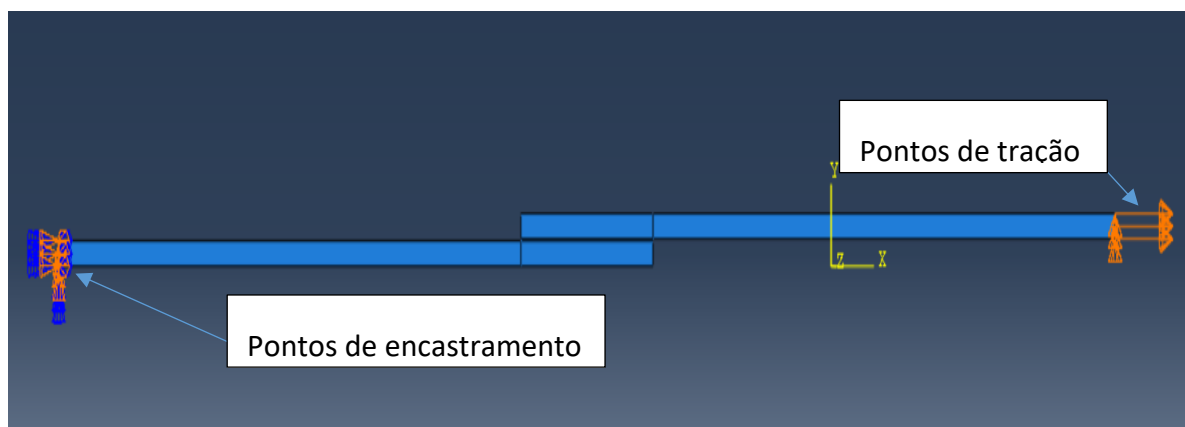








Figura 67 Pontos de encastamento e de tração

5º PASSO – MALHA






Um dos passos com mais relevância para o modelo numérico é a discretização das geometrias em elementos finitos. A regra utilizada para o refinamento da malha consiste em aumentar o refinamento nas zonas com maior variação geométrica e próximo das zonas de propagação de dano. Na Tabela 22 é possível observar quais os tipos de malha utilizados, as suas características, e assinaladas a vermelho, as zonas onde essas malhas são aplicadas. Estas propriedades foram usadas para determinar o comportamento das juntas à tração.

Tabela 22 Tipos de malha e zonas onde foram atribuídas para determinar o comportamento das juntas à tração.

Tipo de malha	Zona
<i>Double Bias</i>	
Tamanho mínimo: 0,2	
Tamanho máximo: 0,5	
Orientação: Do centro para extremidade	
<i>Single Bias</i>	
Tamanho mínimo: 0,2	
Tamanho máximo: 0,5	
Orientação: Da extremidade para a ligação	
<i>Single Bias</i>	
Tamanho mínimo: 0,2	
Tamanho máximo: 0,5	
Orientação: Da extremidade para o centro da ligação	
<i>Single Bias</i>	
Tamanho mínimo: 0,2	
Tamanho máximo: 0,5	
Orientação: Da extremidade para o centro da ligação	
<i>Single Bias</i>	
Tamanho mínimo: 0,2	
Tamanho máximo: 0,5	
Orientação: Da extremidade para o centro da ligação	
<i>By number</i>	
Número de elementos: 1	

Para determinar as tensões de corte e arrancamento foi utilizada a discretização das geometrias em elementos finitos representada na Tabela 23.

Tabela 23 Tipos de malha e zonas onde foram atribuídas para determinar as tensões de corte e arrancamento.

Tipo de malha	Zona
<i>Double Bias</i>	
Tamanho mínimo: 0,02	
Tamanho máximo: 0,05	
Orientação: Do centro para extremidade	
<i>Single Bias</i>	
Tamanho mínimo: 0,02	
Tamanho máximo: 0,05	
Orientação: Da extremidade para a ligação	
<i>Single Bias</i>	
Tamanho mínimo: 0,02	
Tamanho máximo: 0,05	
Orientação: Da extremidade para o centro da ligação	
<i>Single Bias</i>	
Tamanho mínimo: 0,02	
Tamanho máximo: 0,05	
Orientação: Da extremidade para o centro da ligação	
<i>By number</i>	
Número de elementos: 10	

Neste passo também é necessário definir os tipos de elementos das malhas. Para esta simulação a malha foi do tipo estrutural, identificada a verde, e *sweep*, identificada a amarelo, para os elementos aderentes a malha utilizada para simular a propagação do dano é do tipo estrutural, para os elementos coesivos do material adesivo foi utilizado um tipo de malha *sweep*, com o intuito de simular a propagação de dano. Na Figura 68 é possível identificar quais as zonas em que os diferentes tipos de malha foram

aplicados. Por fim é necessário atribuir o tipo de elemento. Para as regiões *sweep* foram atribuídos elementos coesivos com viscosidade de 1×10^{-5} Pa.s. Para as regiões do tipo estrutural, o elemento atribuído foi um elemento bidimensional de estado plano de deformação com viscosidade de 1×10^{-5} Pa.s.

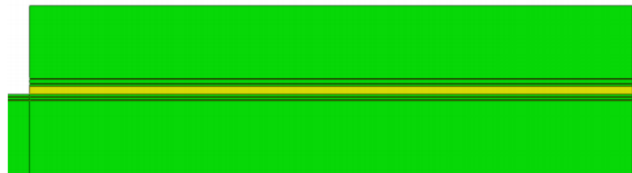


Figura 68 Diferentes tipos de malha nas várias regiões.

Para analisar as tensões de arrancamento e de corte, o tipo de malha utilizada para simular a propagação de dano no material adesivo deixa de ser do tipo *sweep*, passando a ser do tipo estrutural.

6º PASSO – SIMULAÇÃO

Por fim é necessário proceder à corrida da simulação numérica, sendo necessário definir a paralelização e a memória de análise. De seguida, é necessário atribuir um nome e dar início à simulação. Nas simulações foi utilizado processamento paralelo com 4 processadores e 80% da memória do computador.

3.2.2 Modelo de dano utilizado

As leis coesivas utilizadas variam consoante o comportamento do tipo de material ou da interface, com o objetivo de obter resultados mais precisos [123]. Foram desenvolvidos vários tipos de modelos dano ao longo do tempo, dos quais é possível destacar o triangular [37], o exponencial [38], o linear parabólico [124], o polinomial [39] e o trapezoidal [34]. Devido ao reduzido número de parâmetros a determinar, fácil aplicação e precisão dos resultados obtidos para maioria dos casos em estudo, o modelo triangular é o mais utilizado [40]. Na Figura 69 está representado o modelo de dano coesivo 2D, em que a lei de maior dimensão representa a lei do modo puro e as leis de menor dimensão representa a lei do modo misto.

O modo puro é caracterizado pela propagação do dano que ocorre num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões são anulados pela respetiva lei coesiva. O modo misto utiliza critérios de tensões e energéticos para combinar a tração e corte [59]. Os elementos coesivos estão sujeitos a uma componente direta de deformação de tração e a uma componente de deformação de corte, ambas determinadas com recurso à cinemática do elemento. Em camadas finas, entre aderentes rígidos, as tensões existentes na membrana são desprezadas.

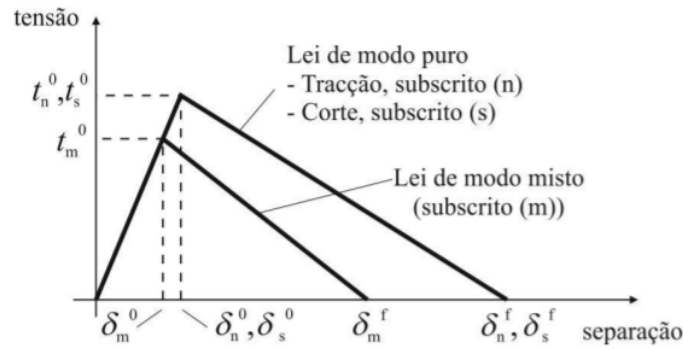


Figura 69 Lei triangular do dano coesivo.

A relação entre tensões e deformações antes da ocorrência do dano é definida pelo produto da matriz K_{COH} e do vetor ε , que relaciona as tensões e deformações em tração e corte pela expressão:

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{ns} & k_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = K_{COH} \cdot \varepsilon \quad (8)$$

Nesta matriz encontram-se representados os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição depende da formulação utilizada. A formulação do tipo local é utilizada para simular fraturas de espessura nula onde os valores parâmetros da matriz dos parâmetros da matriz são elevados, com o propósito de não induzir deformações na estrutura [125]. A formulação do tipo contínua de camadas finas, para ligações adesivas, permite obter uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo que:

$$K_{nn} = E, K_{ss} = G, K_{ns} = 0 \quad (9)$$

em que E é o modulo de elasticidade longitudinal e G é o modulo de elasticidade transversal. Com estes parâmetros é possível obter uma deformação fiel da camada de adesivo [59]. Em modo misto, é possível definir a iniciação do dano através de diferentes critérios, como o critério quadrático de tensão, expresso pela equação:

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\langle t_s \rangle}{t_s^0} \right\}^2 = 1 \quad (10)$$

em que $\langle \rangle$ são os parênteses de Macaulay que indicam que tensões de compressão não induzem dano. Este critério tem como principal característica a precisão dos resultados obtidos, testada anteriormente [126]. Quando t_m^0 , definido anteriormente, é atingido (Figura 69), a rigidez do material começa a sofrer um processo de amaciamento. A separação total de um par de nós homólogos (δ_m^f na Figura 69) é prevista através de um

critério linear energético em função dos valores de G_{IC} e G_{IIC} , como representado na seguinte equação:

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1 \quad (11)$$

3.2.3 Determinação das propriedades de dano

Para caracterizar as leis coesivas de tração e de corte é necessário conhecer os valores de t_n^0 , t_s^0 , G_{IC} e G_{IIC} . Alguns estudos publicados assumiram, que por aproximação, os estes parâmetros eram idênticos aos obtidos por ensaios de tração [127, 128]. Contudo a restrição às deformações na camada de adesivo provocada pelo substrato neste tipo de geometrias, bem como a propagação da fenda que regra geral ocorre em modo misto, fazem com que exista uma diferença entre as propriedades do adesivo enquanto material maciço e enquanto camada fina [60, 129]. Assim, é recomendada a utilização de métodos que definam estes valores de forma a que traduzam o comportamento do adesivo nas condições em que este é utilizado.

A determinação das propriedades de dano, registadas na Tabela 24, deu-se com recurso ao método inverso, descrito no trabalho de Campilho et al. [130].

Tabela 24 Propriedades do adesivo obtidas pelo método inverso.

	Adesivo	E (MPa)	G (MPa)	t_n^0 (MPa)	t_s^0 (MPa)	G_{IC} (N/mm)	G_{IIC} (N/mm)
Alumínio	CFRP 0°	3000	1150	6	6	0,8	1,6
	CFRP +/- 45°	3000	1150	3,6	3,6	0,8	1,6
	CFRP 90°	3000	1150	10	10	0,8	1,6
	GFRP 0/90°	3000	1150	20	20	0,3	0,6
	GFRP +/- 45°	3000	1150	43	43	0,3	0,6
GFRP	CFRP 0°	3000	1150	12,5	12,5	0,8	1,6
	CFRP 90°	3000	1150	7,5	7,5	0,8	1,6
	GFRP +/- 45°	3000	1150	60	60	0,3	0,6
CFRP	CFRP 90°	3000	1150	11	11	0,8	1,6
	GFRP +/- 45°	3000	1150	60	60	0,3	0,6

3.2.4 Análise de tensões na junta

Neste subcapítulo são apresentadas as tensões de corte (τ_{xy}) e as tensões de arrancamento (σ_y) em função do comprimento de sobreposição (L_0), considerando os vários tipos de juntas. As tensões representadas foram obtidas no plano médio da zona de ligação. Na obtenção dos gráficos procedeu-se a um processo de normalização. As tensões de corte e arrancamento foram divididas pela tensão média de corte (τ_{avg}), para o respetivo valor de L_0 . Também L_0 (x/L_0) sofreu um processo de normalização similar, em que x representa a extremidade esquerda do adesivo. O intervalo do gráfico é dado por $0 \leq x/L_0 \leq 1$.

TENSÕES DE CORTE

As tensões de corte encontram-se ilustradas na Figura 70, Figura 71, e Figura 72. A distribuição das tensões de corte atinge o seu valor máximo nas extremidades da sobreposição, e o valor mínimo na região interior do material adesivo [130, 131]. Este comportamento deve-se à deformação diferencial que cada um dos aderentes apresenta ao longo da sobreposição, que é nula na extremidade livre dos aderentes e aumenta de forma progressiva até à extremidade oposta [21, 132, 133]. Na região interior do material adesivo estes efeitos são anulados, com o desenvolvimento de tensões de corte apenas devido ao esforço de tração aplicada na junta. Os gradientes de tensão de corte aumentam com o L_0 devido ao gradiente crescente de deformações longitudinais causados pelas cargas aplicadas e grandes áreas de colagem. Neste estudo o material adesivo utilizado tem um comportamento frágil, o que afeta negativamente a resistência da junta, visto que o adesivo não permite plastificação nas extremidades da sobreposição [133].

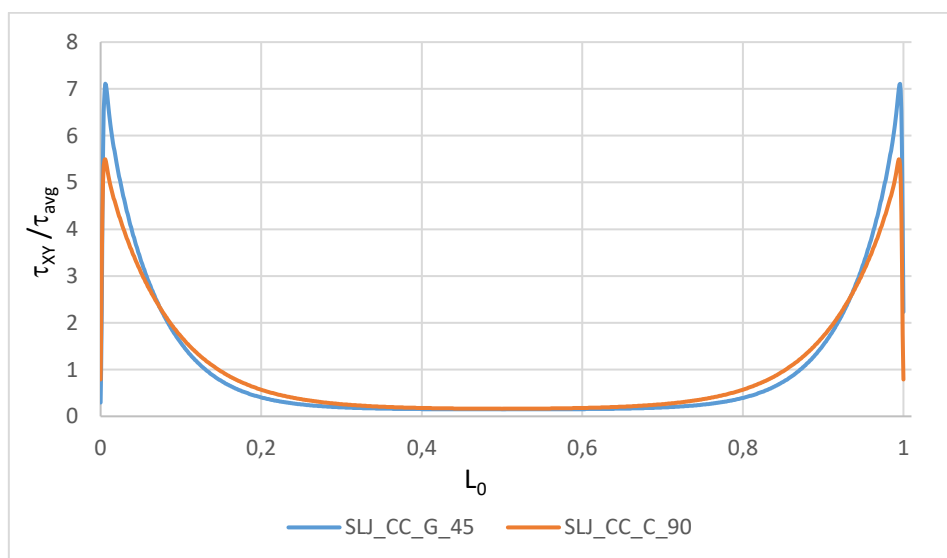


Figura 70 Tensões de corte instaladas nas juntas com substrato de CFRP.

É possível verificar que o material adesivo que apresenta menor concentração de tensões de corte é CRFP com as fibras orientadas a 90°.

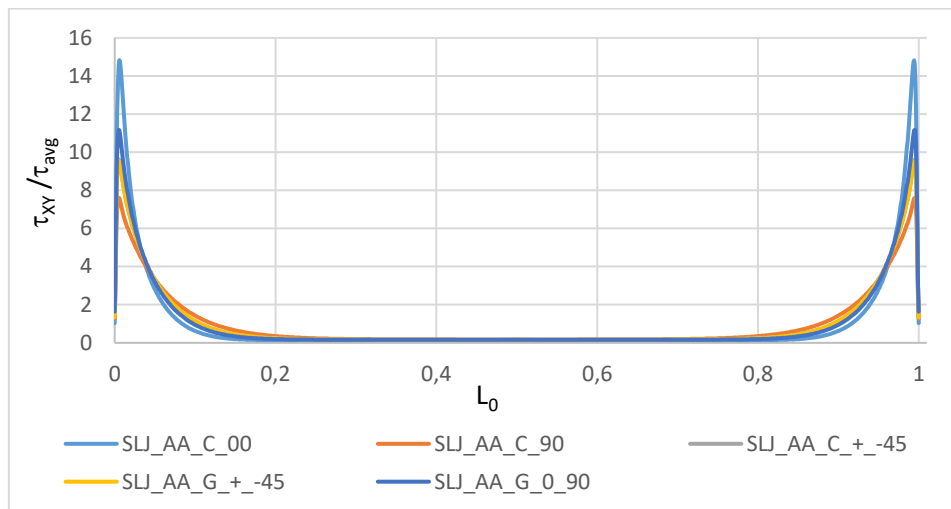


Figura 71 Tensões de corte instaladas nas juntas de alumínio.

Após a análise da Figura 71 observa-se que a concentração de tensões de corte é menor nos materiais adesivos que apresentam as fibras perpendiculares ao esforço de tração.

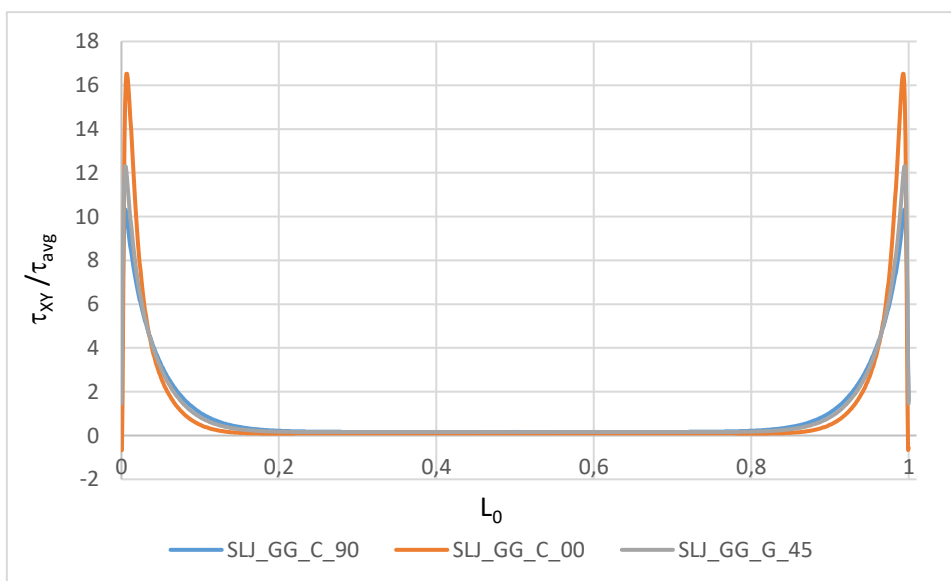


Figura 72 Tensões de corte instaladas nas juntas de GFRP.

Também com a análise da Figura 72 é possível concluir que o material adesivo que apresenta menor concentração de tensões é aquele que apresenta as fibras orientadas perpendicularmente ao esforço de tração, e à medida que material adesivo tem as fibras com a mesma orientação do esforço as tensões aumentam.

Na Figura 73 é ilustrado um resumo das tensões de corte instaladas nas juntas.

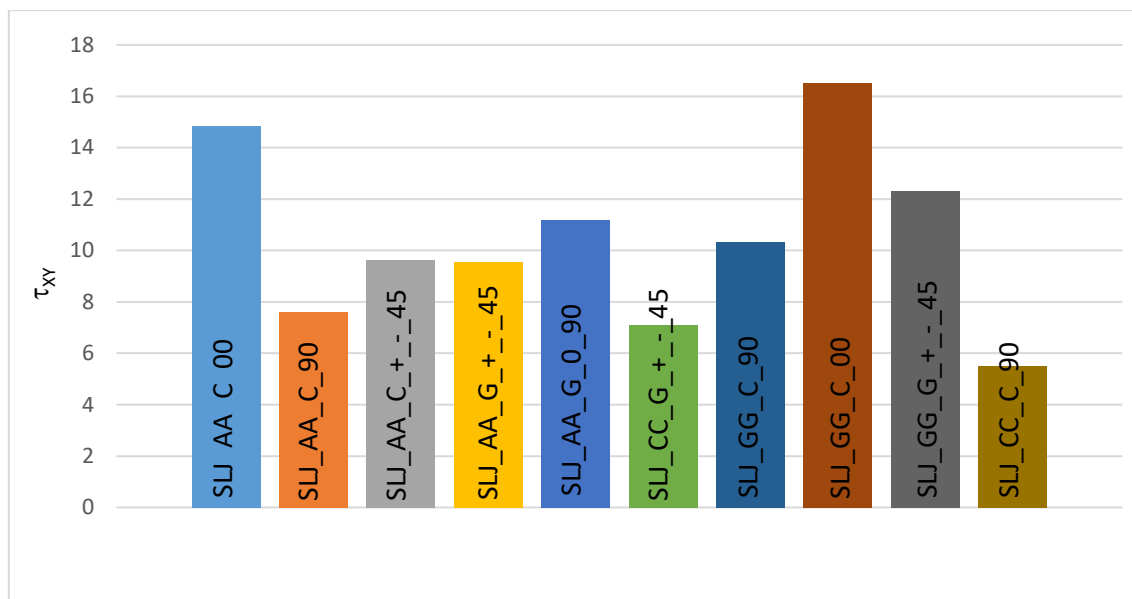


Figura 73 Resumo das tensões de corte instaladas nas juntas

TENSÕES DE ARRANCAMENTO

As tensões de arrancamento em função de L_0 encontram-se representadas na Figura 74, Figura 75, e Figura 76. De forma geral, as tensões de arrancamento apresentam uma magnitude de valores inferior às tensões de corte, exceto em zonas localizadas nas extremidades da junta, onde existem singularidades devido à geometria das extremidades da junta [134, 135].

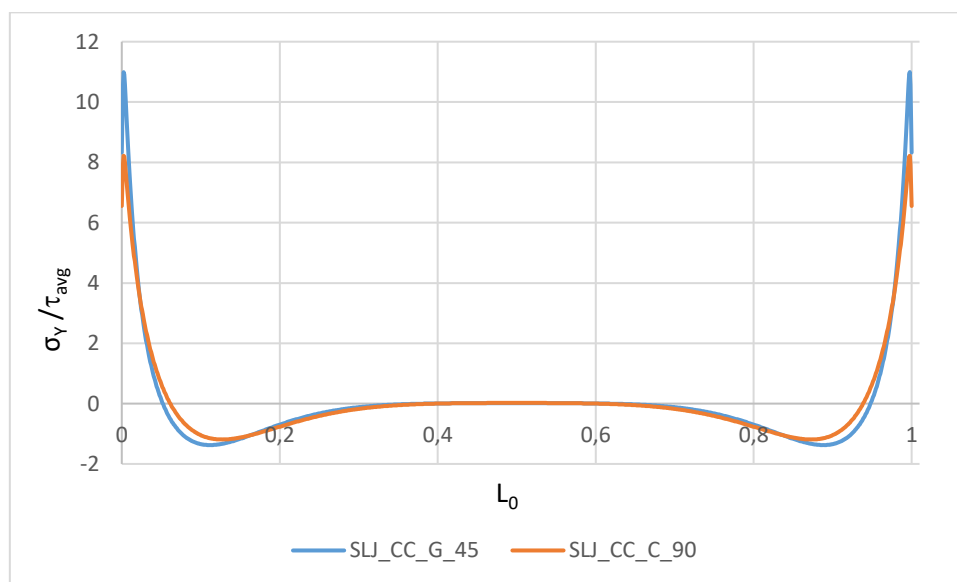


Figura 74 Tensões de arrancamento instaladas nas juntas de CFRP.

Na região interior da camada do material adesivo são geradas tensões de compressão e nas extremidades tensões de tração. Este efeito está relacionado com a deformação transversal da junta, que na sua maioria é afetada pela deformação dos aderentes, o

que provoca a separação nas extremidades na camada do material adesivo e compressão na zona intermédia. O aumento das tensões de arrancamento origina uma diminuição da resistência das juntas, podendo originar a sua rotura [125, 126]. Através da análise deste é possível concluir que o adesivo que apresenta menor concentração de tensões é o CRFP com as fibras orientadas a 90°.

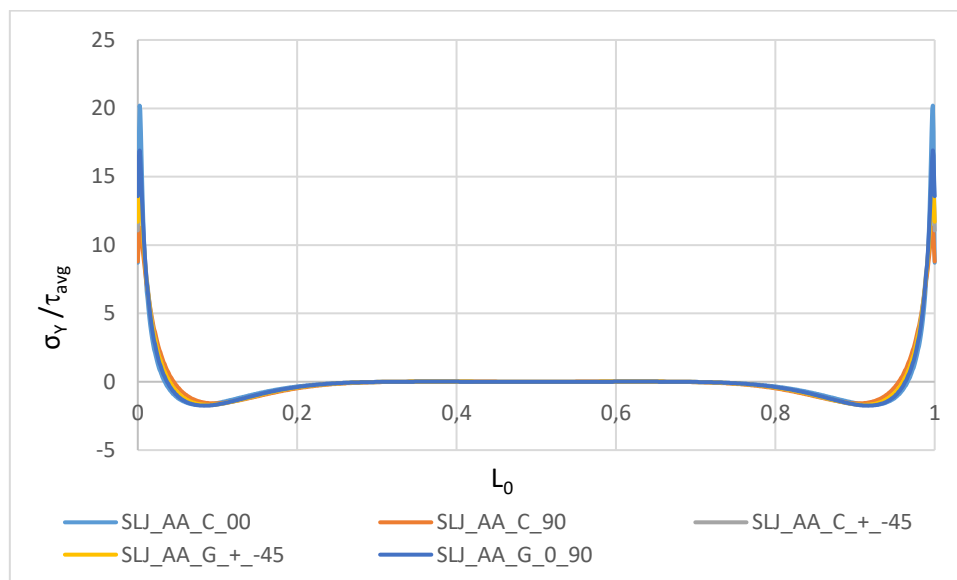


Figura 75 Tensões de arrancamento instaladas nas juntas de alumínio.

Através da análise da Figura 75 é possível perceber que o material adesivo que apresenta menor concentração de tensões é o CFRP com as fibras orientadas a 90° e à medida que as fibras, independentemente do material adesivo, ficam com o mesmo sentido dos esforços de tração, as tensões aumentam.

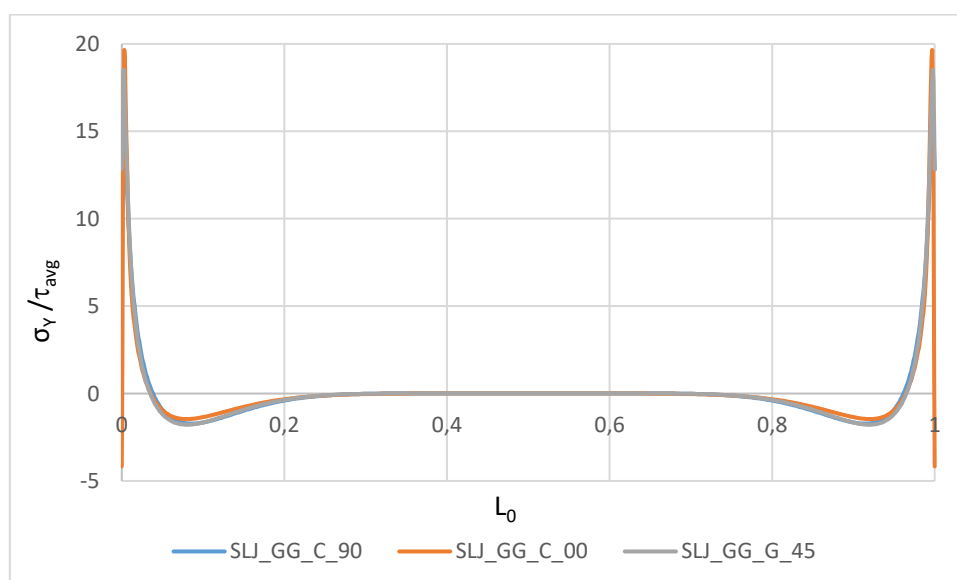


Figura 76 Tensões de arrancamento instaladas nas juntas de GFRP.

Através da análise da Figura 76 é possível concluir que, à medida que as fibras do material adesivo vão tendo uma orientação idêntica à orientação dos esforços de tração, as concentrações de tensões arrancamento aumentam.

Na Figura 77 é ilustrado um resumo das tensões de arrancamento instaladas nas juntas.

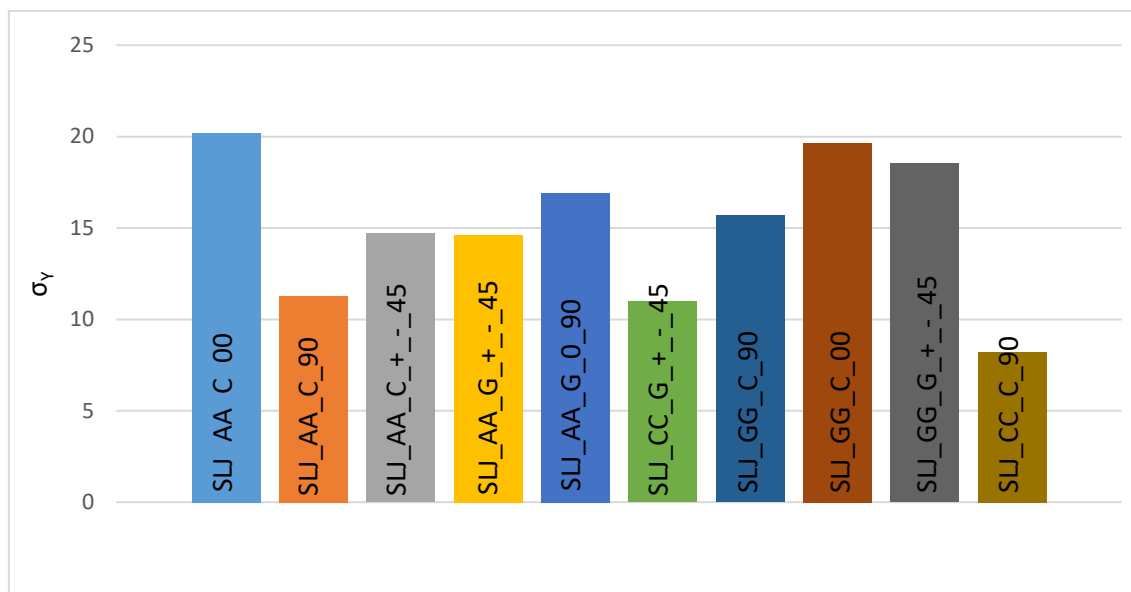


Figura 77 Resumo das tensões de arrancamento nas juntas

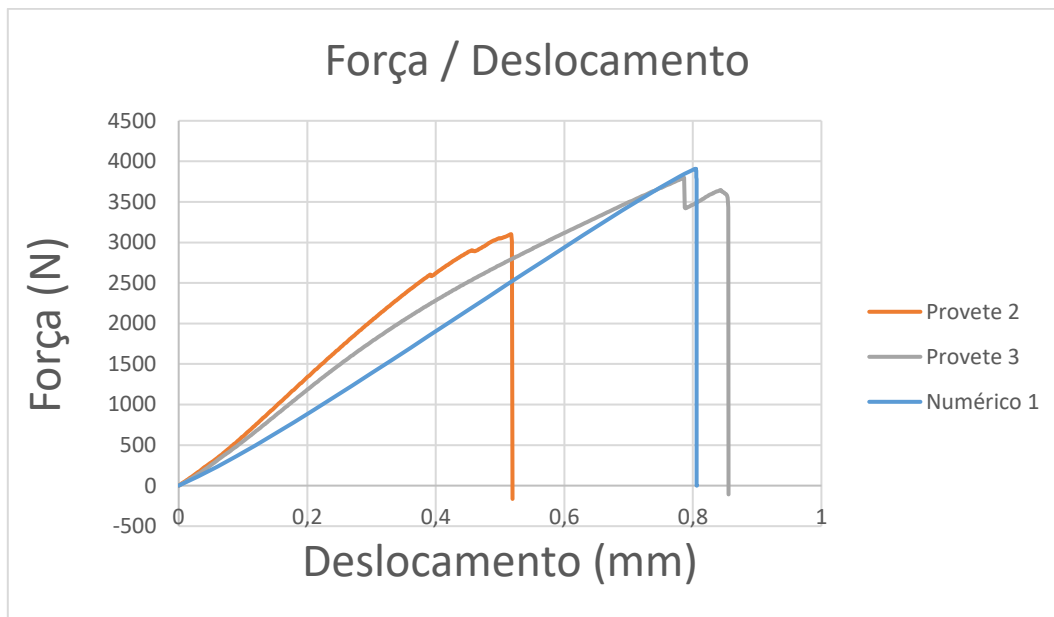
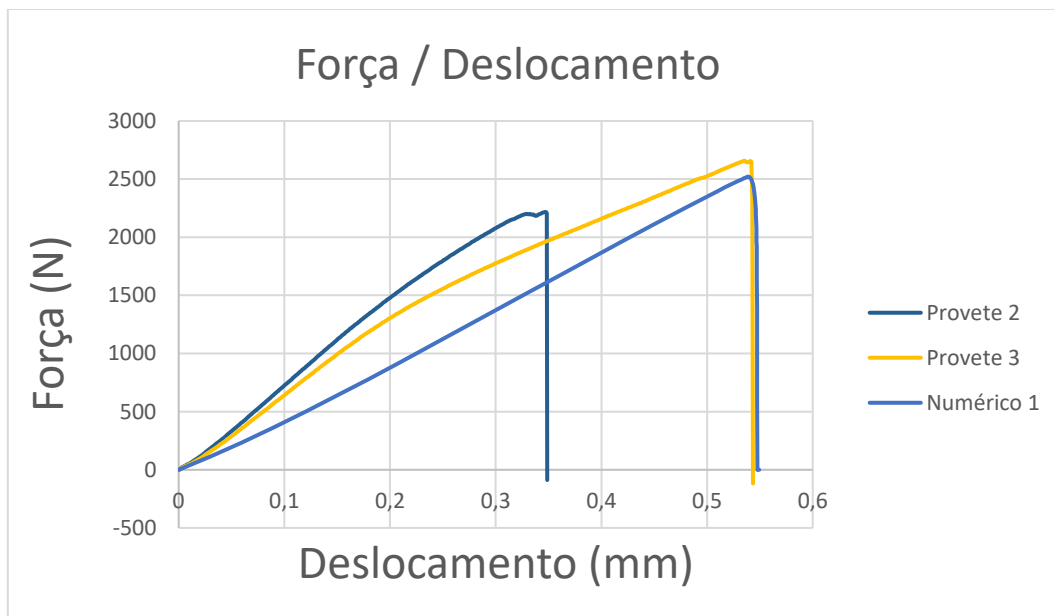
3.2.5 Previsão do comportamento

Neste subcapítulo são abordadas as curvas $P-\delta$ obtidas através dos modelos numéricos e comparadas com os resultados obtidos experimentalmente. Também os modos de rotura das juntas que forma obtidos.

3.2.5.1 Curvas $P-\delta$

Neste subcapítulo são comparados os resultados obtidos através do modelo numérico com os resultados obtidos de forma experimental, para tal são elaborados gráficos com as curvas $P-\delta$ para os diferentes ensaios. Só os resultados tidos em conta experimentalmente é que se encontram representados.

Na Figura 78, Figura 79, e Figura 80 é apresentada uma comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e os modelos numéricos, para as juntas com substrato de GFRP.

SLJ_GG_C_00Figura 78 Comparação entre curva $P-\delta$ SLJ_GG_C_00, numéricas.**SLJ_GG_C_90**Figura 79 Comparação entre curva $P-\delta$ SLJ_GG_C90, numéricas.

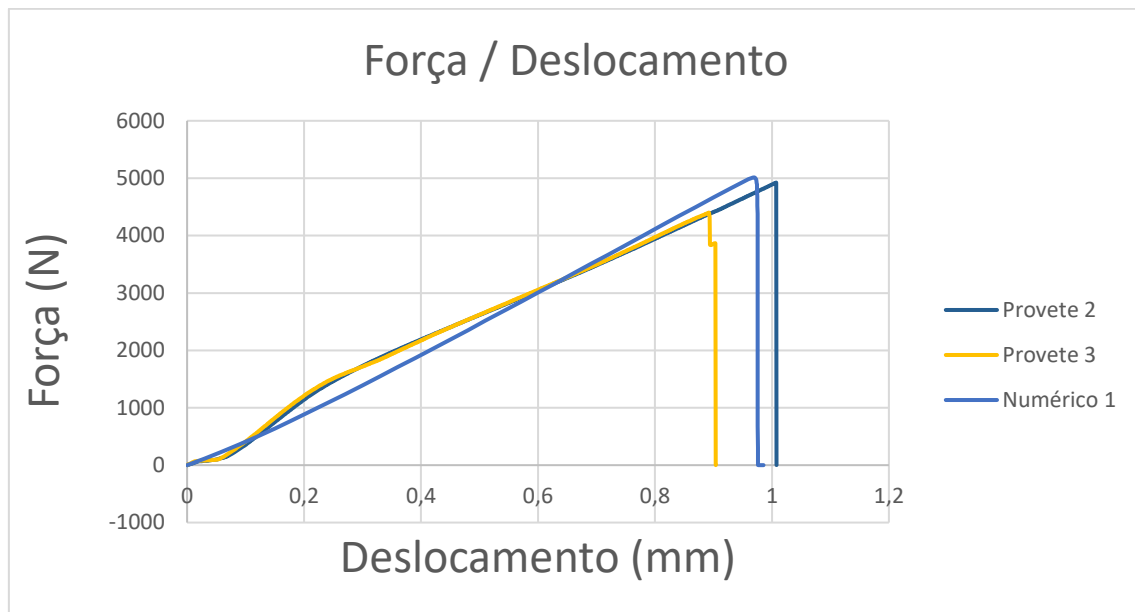
SLJ_GG_G_+/-45

Figura 80 Comparação entre curva $P-\delta$ SLJ_GG_G_+/-45, numéricas

Na Figura 81 e Figura 82 é apresentada uma comparação entre os valores obtidos através dos modelos numéricos e os valores obtidos experimentalmente.

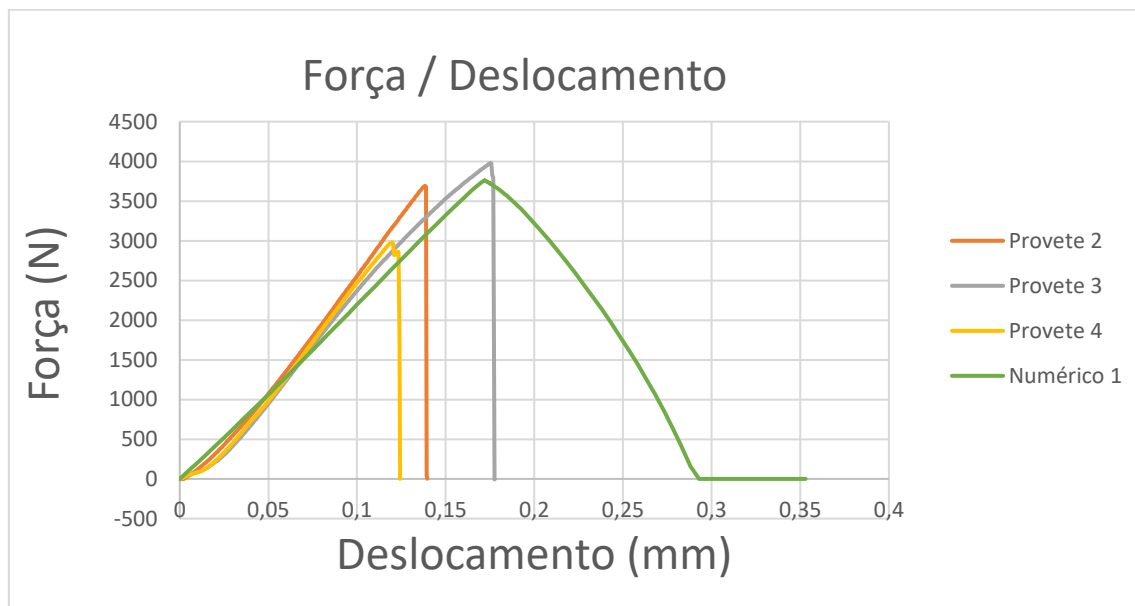
SLJ_CC_C_90

Figura 81 Comparação entre curva $P-\delta$ SLJ_CC_C90, numéricas.

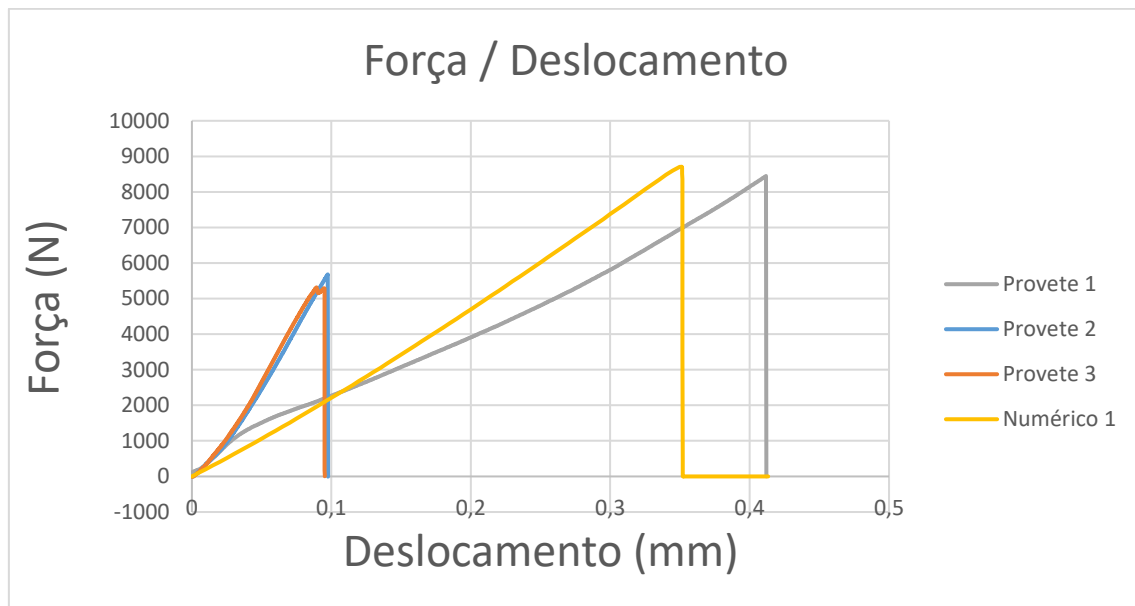
SLJ_CC_G_+/-45

Figura 82 Comparação entre curva $P-\delta$ SLJ_CC_G_+/-45, numéricas.

Na Figura 83, Figura 84, Figura 85, Figura 86, e Figura 87 são comparados os valores obtidos experimentalmente com os valores obtidos através dos modelos numéricos.

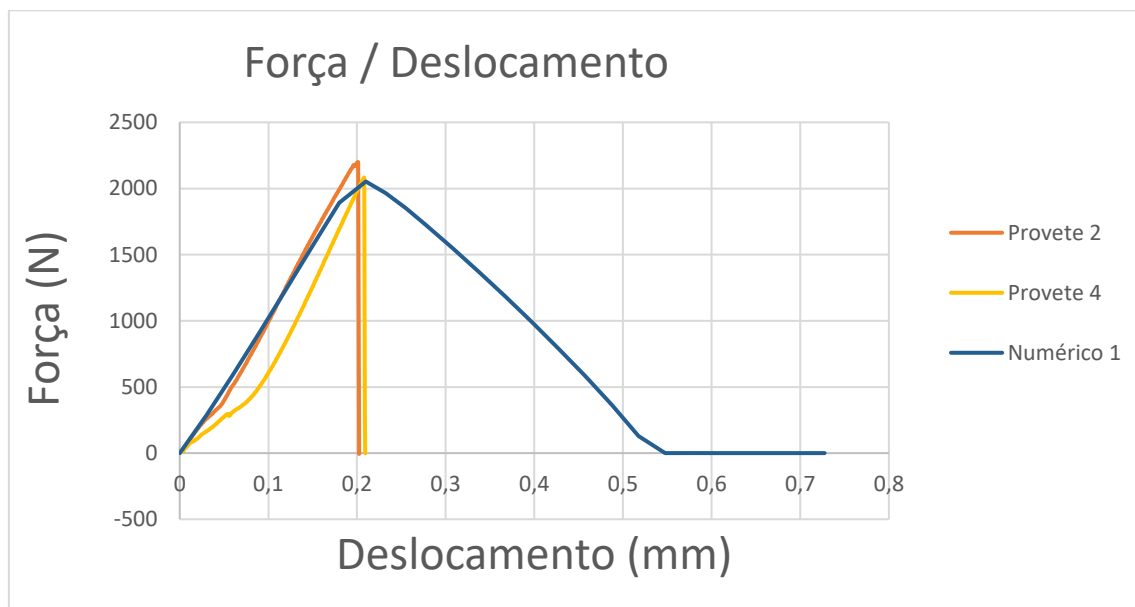
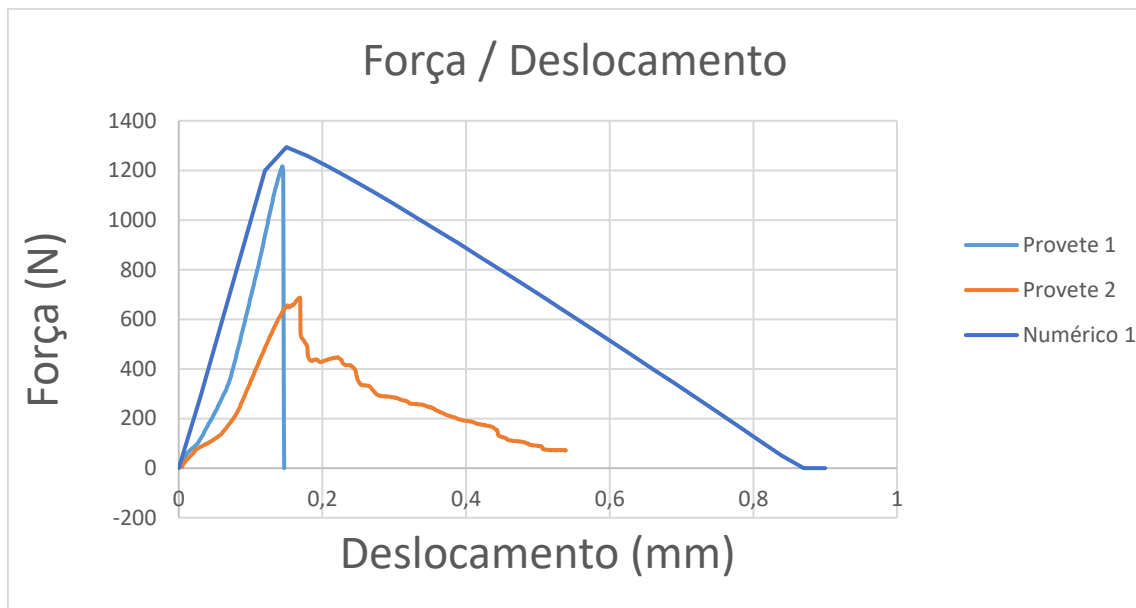
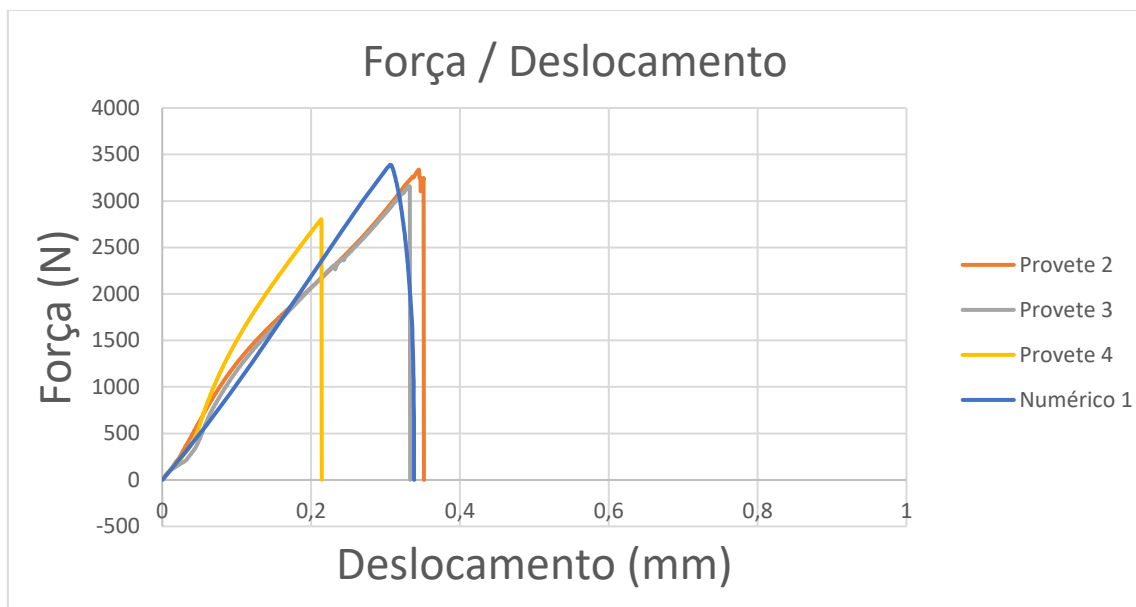
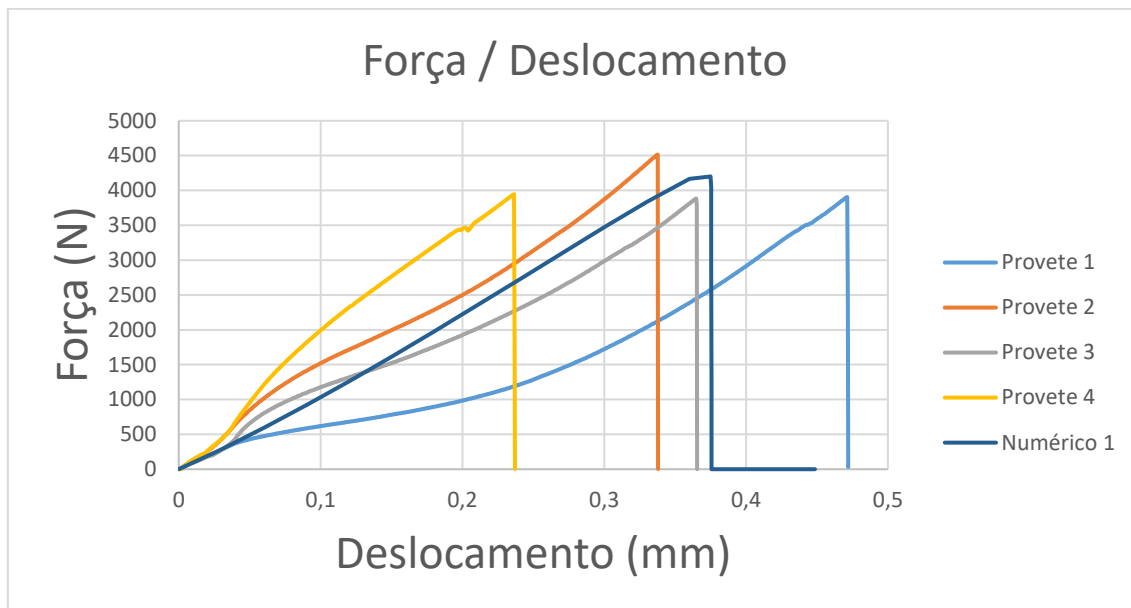
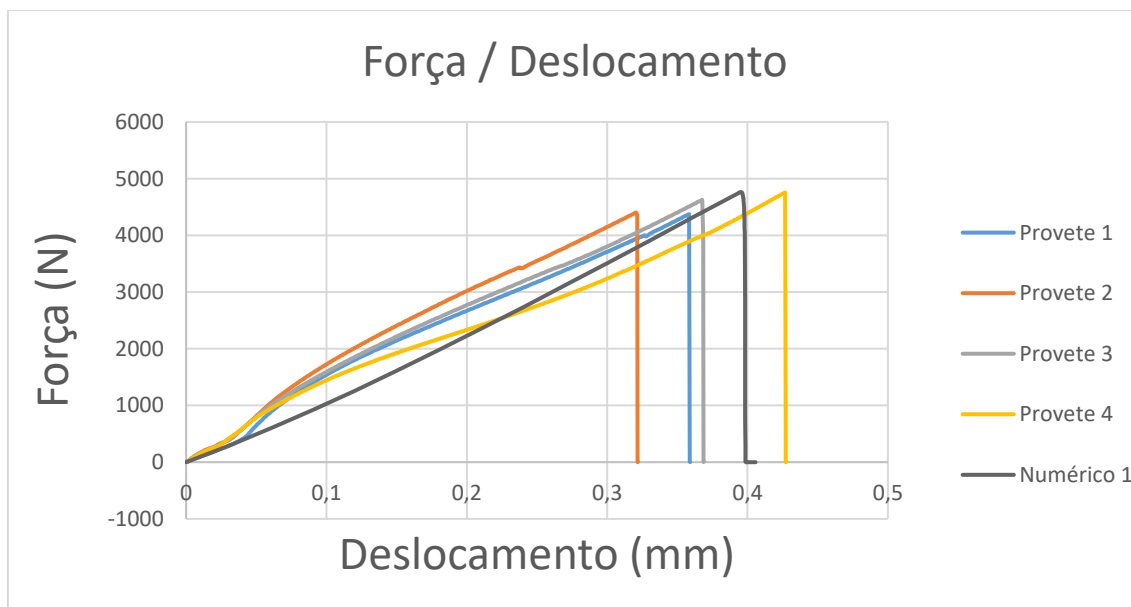
SLJ_AA_C_00

Figura 83 Comparação entre curva $P-\delta$ SLJ_AA_C_00, numéricas.

SLJ_AA_C_+/-45Figura 84 Comparação entre curva $P-\delta$ SLJ_AA_C_+/-45, numéricas**SLJ_AA_C_90**Figura 85 Comparação entre curva $P-\delta$ SLJ_AA_C_90, numéricas.

SLJ_AA_G_0/90Figura 86 Comparação entre curva $P-\delta$ SLJ_AA_G_0/90, numéricas.**SLJ_AA_G_+/-45**Figura 87 Comparação entre curva $P-\delta$ SLJ_AA_G_+/-45, numéricas.

Através da análise dos gráficos é possível concluir que estes aproximam-se bastante das curvas obtidas experimentalmente, o que significa que a relação entre os modelos numéricos e os resultados obtido experimentalmente é bastante fidedigna, nas juntas com substrato de CFRP e GFRP.

3.2.5.2 Modos de rotura

Os modos de rotura originados pelos métodos numéricos são coesivos, como é ilustrado na Figura 88 e Figura 89, comparativamente com os modos de rotura obtidos experimentalmente as juntas com substrato de alumínio apresentam roturas adesivas o que significa que as propriedades mecânicas do adesivo não foram utilizadas na sua plenitude, já o material adesivo com substrato de CFRP e GFRP apresentam roturas coesiva e interlaminar, indicando assim que o modelo utilizado se aproximados resultados experimentais.

Através do estudo da variável de dano SDEG é possível visualizar a evolução do dano dos elementos coesivos da camada de adesivo ao longo da ligação adesiva. Esta variável representa a degradação da rigidez da lei coesiva em modo misto do MDC e varia entre $SDEG = 0$, em que não existe dano no material, e $SDEG = 1$, em que ocorre a rotura completa.

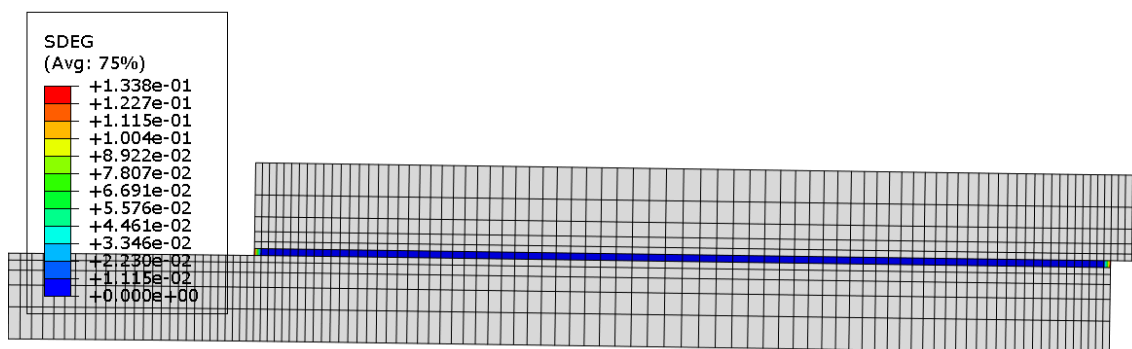


Figura 88 Início da degradação da junta no *software* Abaqus®.

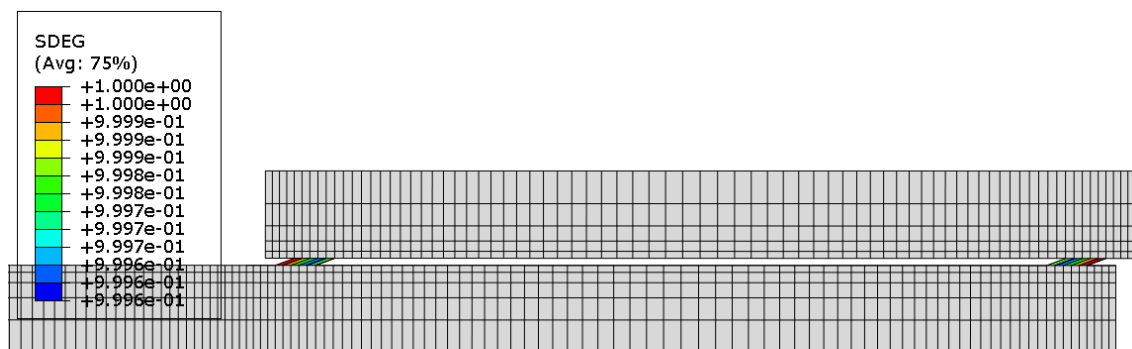


Figura 89 Simulação da rotura no *software* Abaqus®.

3.2.5.3 Resistência das juntas

Neste subcapítulo são analisados os resultados obtidos nos modelos numéricos da resistência das juntas. Para melhor perceber a diferença entre os resultados obtidos experimentalmente e os resultados obtidos através dos modelos numéricos foram divididas as forças obtidas numericamente pelas forças médias obtidas experimentalmente com o intuito de determinar quais os modelos numéricos que representam com mais exatidão os resultados obtidos experimentalmente.

Os resultados são apresentados na Tabela 25 e comparados com os resultados obtidos experimentalmente.

Tabela 25 Comparação experimental/numérica da resistência das juntas

Substrato	Adesivo	Experimental		Numérico		Percentagem do desvio relativo (%)
		Força (N)	média	Desvio-padrão	Força (N)	
Alumínio	CFRP 0°	1660,9		482,7	2052,6	23,6
	CFRP +/-45°	757,5		349,5	1293,8	70,8
	CFRP 90°	3100,0		221,1	3389,7	9,34
	GRRP 0/90°	4063,4		261,6	4201,4	3,4
	GFRP +/- 45°	4539,3		157,7	4762,8	4,9
GFRP	CFRP 0°	3450,7		348,3	3907,1	13,2
	CFRP 90°	2437,1		220,4	2521,0	3,4
	GFRP +/- 45°	4662,2		261,4	5013,9	7,5
CFRP	CFRP 90°	3711,1		212,1	3758,7	1,3
	GFRP +/- 45°	6482,432		1398,19	8707,638	34,3

3.2.6 Análise de resultados

Neste subcapítulo serão analisados os resultados obtidos através dos modelos e comparados com valores obtidos experimentalmente, a fim de validar a capacidade dos modelos em prever o comportamento das juntas.

Em relação aos modos de rotura observados através dos modelos numéricos, as roturas dos materiais adesivos são coesivas. Nos modelos experimentais, as juntas com substrato de alumínio são maioritariamente adesivas. Esta incongruência pode ser justificada pelas condições de processamento das juntas ou pela incorreta aplicação do material adesivo. A fim de garantir uma distribuição uniforme do material adesivo nas juntas durante o processo de cura são adicionadas chapas de alumínio antes de iniciar o processo de cura. Eventualmente poderão ter existido zonas em que material adesivo não ficou distribuído uniformemente ou a espessura das chapas utilizadas para o nivelamento não foi o mais adequado. Já no caso das juntas com substrato de CFRP e GFRP os modos de rotura obtidos experimentalmente foram coesivos, o que indica que houve um maior aproveitamento das propriedades mecânicas do material adesivo. Com o objetivo de aproximar os modelos numéricos aos resultados obtidos experimentalmente, utilizou-se o método inverso, uma vez que através da manipulação das propriedades mecânicas do material adesivo, no modelo numérico, é possível replicar o seu comportamento ao longo dos ensaios, revelando-se assim um método bastante fidedigno.

Quando os dados presentes na Tabela 25 são conjugados com a análise aos modos de rotura é possível concluir que os modelos numéricos utilizados para reproduzir as juntas com substratos de CFRP e GFRP são bastante fidedignos, uma vez que os valores obtidos pelo método numérico se aproximam dos valores médios obtidos experimentalmente, exceto no caso do CFRP +/-45, uma vez que apresenta um desvio de 34,3%. As juntas com substrato de alumínio são as que apresentam maior percentagem de desvio relativo, facto este que pode ser justificado com falta de homogeneidade dos valores de resistência em juntas com substrato de alumínio.

Numa análise preliminar é possível perceber que as tensões de arrancamento instaladas são superiores às tensões de corte. Também é possível reter que as juntas com substrato de GFRP são as que, de forma geral, apresentam maiores tensões de arrancamento e corte para o mesmo material adesivo, de seguida as juntas de alumínio, e por fim as de CFRP. Estas últimas são as juntas que apresentam menores tensões instaladas, como é demonstrado quando comparando os valores da Tabela 26 com os valores da Tabela 27 e da Tabela 28. Estes resultados são justificados pelo modo de elasticidade apresentados pelos diferentes substratos, uma vez que o menor é o GFRP, seguido do alumínio e por fim o CFRP.

Tabela 26 Resistência obtida pelo método numérico vs Tensões geradas nas juntas com substrato de alumínio.

Material adesivo	σ_y/τ_{avg}	τ_{xy}/τ_{avg}	Força máxima (N)
CFRP 0°	20,2	14,8	2052,6
CFRP +/-45°	14,7	9,6	1293,8
CFRP 90°	11,3	7,6	3389,7
GFRP 0°/90°	16,9	11,2	4201,4
GFRP +/-45°	14,6	9,5	4762,8

Com a análise da Tabela 26, é possível determinar que o material adesivo, nas juntas com substrato de alumínio, que apresenta menores tensões instaladas é CFRP com as fibras orientadas a 90°, 55% do valor de tensões de corte e arrancamento máximas, por outro lado o material adesivo que apresenta melhor performance é o GFRP com as fibras orientadas a +/-45°, uma vez que apresenta percentualmente valores tensão de arrancamento 72 %, e 64% de tensão de corte, e é o material adesivo que apresenta melhor resistência à tração.

Tabela 27 Resistência obtida pelo método numérico vs Tensões geradas nas juntas com substrato de CFRP.

Material adesivo	σ_y/τ_{avg}	τ_{xy}/τ_{avg}	Força máxima (N)
CFRP 90°	8,2	5,5	3758,8
GFRP +/-45°	11,0	7,1	8707,6

No caso das juntas com substrato de CFRP (Tabela 27), o material adesivo que de forma geral apresenta melhores resultados é GFRP com as fibras orientadas a +/-45°, pois embora as tensões de corte e arrancamento sejam as maiores, a diferença para o material adesivo CFRP com as fibras orientadas a 90° é residual, e a resistência à tração obtida é superior a 100%, quando comparada com o material adesivo GFRP com as fibras orientadas a +/-45°.

Com a análise da Tabela 28, o material adesivo que apresenta melhor performance é GFRP com as fibras orientadas a +/-45°, uma vez que percentualmente apresenta valores tensão de arrancamento 35 % inferior, e de tensão de corte 25 % inferior comparativamente com o material adesivo CFRP com as fibras orientadas a 0°, que é o material adesivo que apresenta a menor concentração de tensões. O GFRP com as fibras orientadas a +/-45° é o material adesivo que apresenta melhor resistência à tração.

Tabela 28 Resistência obtida pelo método numérico vs Tensões geradas nas juntas com substrato de GFRP.

Material adesivo	σ_y/τ_{avg}	τ_{xy}/τ_{avg}	Força máxima (N)
CFRP 0°	19,7	16,5	3907,2
CFRP 90°	15,7	10,3	2521,0
GFRP +/-45°	18,5	12,3	5014,0

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 CONCLUSÕES

Através da realização da presente dissertação foi possível tirar conclusões sobre a adesão de vários tipos de juntas com diferentes substratos e diferentes tipo de materiais compósitos como material adesivo. O principal objetivo desta dissertação consiste em determinar qual a melhor combinação de substrato e material adesivo. Experimentalmente as combinações que apresentam melhores resultados são as que utilizam substrato de CFRP e GFRP, já o material adesivo que apresenta melhores resultados é GFRP com as fibras orientadas a $\pm 45^\circ$ nos diferentes tipo de substrato. De salientar que as ligações com substrato de alumínio tiveram na sua maioria roturas adesivas, o que não permite tirar as conclusões mais assertivas sobre esse tipo de juntas.

Outro objetivo desta dissertação consistia na simulação e validação através de modelos numéricos, incluindo propagação de dano por MDC, dos resultados obtidos experimentalmente, com a finalidade de replicar os resultados das juntas obtidos experimentalmente. A simulação consistiu em replicar o comportamento das juntas durante os ensaios de tração experimentais e, recorrendo ao método inverso, aprimorar as curvas $P-\delta$ com a finalidade de conseguir a resistência mais aproximada da obtida experimentalmente. A fim de determinar qual a melhor combinação de substrato e material adesivo tornou-se necessário quantificar as tensões instaladas na junta. Combinando estes dados com os dados de resistência e os modos de rotura é possível concluir que a melhor combinação é o tipo de junta com substrato de CFRP e material adesivo GFRP com as fibras orientadas a $\pm 45^\circ$, visto ser o tipo de ligação com maior resistência à tração e segundo com menor concentração de tensões, sendo que somente o tipo de junta com substrato de CFRP e material adesivo CFRP com as fibras orientadas a 90° obteve concentração de tensões mais baixas. Com esta dissertação conclui-se que através do método inverso, é possível obter resultados numéricos bastante próximos dos obtidos experimentalmente, uma vez que através da manipulação das propriedades mecânicas da junta foi possível convergir para os resultados experimentais.

4.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Com esta dissertação foi possível identificar futuros estudos, como análise de diferentes geometrias de junta ligadas com *prepregs* ou outros sistemas compósitos (adesivos reforçados) para diminuir as concentrações de tensões, em especial das tensões de corte visto serem as mais críticas, quando as juntas estão sujeitas a esforços de tração.

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000, Nova Iorque, EUA: McGraw-Hill.
2. Su, N., R. Mackie, and W. Harvey, *The effects of ageing and environment on the fatigue life of adhesive joints*. *International journal of adhesion adhesives*, 1992. **12**(2): p. 85-93.
3. Désagulier, C., *Aerospace Industry*, in *Handbook of Adhesion Technology*, Andreas Öchsner, Lucas F. M. da Silva, and R.D. Adams, Editors. 2011, Springer: Berlim, Alemanha.
4. McCall, S.H.C.P., et al., *A Unified Space Environment Effects Database for Russian and North American Organic and Inorganic Materials*, in *Protection of Materials and Structures from Space Environment*, J. Kleiman, Editor. 2004, Springer: Berlim, Alemanha. p. 139-154.
5. Adams, R.D., *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2005, Amsterdão, Países Baixos: Elsevier.
6. Dilger, K., B. Burchardt, and M. Frauenhofer, *Automotive Industry*, in *Handbook of Adhesion Technology*, L.F.M. da Silva, A. Öchsner, and R.D. Adams, Editors. 2018, Springer International Publishing: Berlim Alemanha. p. 1333-1366.
7. Suzuki, Y., *Railway Industry*, in *Handbook of Adhesion Technology*, L.F.M. da Silva, A. Öchsner, and R.D. Adams, Editors. 2011, Springer: Berlim, Alemanha.
8. Davies, P., *Marine industry*, in *Handbook of Adhesion Technology*, L.F.M. da Silva, A. Öchsner, and R.D. Adams, Editors. 2011, Springer: Berlim, Alemanha.
9. De Barros, S., et al., *Oil Industry*, in *Handbook of Adhesion Technology*, L.F.M. da Silva, A. Öchsner, and R.D. Adams, Editors. 2017, Springer: Berlim, Alemanha.
10. Hartung, I. and S. Boehm, *Civil construction*, in *Handbook of adhesion technology*, L.F.M. da Silva, A. Öchsner, and R.D. Adams, Editors. 2011, Springer: Berlim, Alemanha.
11. Jung, S.-B. and J.-W. Kim, *Electrical Industry*, in *Handbook of Adhesion Technology*, L.F.M. da Silva, A. Öchsner, and R.D. Adams, Editors. 2011, Springer: Berlim, Alemanha.
12. Dinte, E. and B. Sylvester, *Adhesives: Applications and Recent Advances*, in *Applied Adhesive Bonding in Science and Technology*, H. Ozer, Editor. 2018, IntechOpen: Londres, Inglaterra.
13. Nicholson, J.W., *Adhesive Dentistry*, in *Handbook of Adhesion Technology*, L.F.M. da Silva, A. Öchsner, and R.D. Adams, Editors. 2018, Springer International Publishing: Berlim, Alemanha. p. 1703-1728.
14. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhães, and M.F.S. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007, Porto, Portugal Publindústria

15. Sancaktar, E., *12 Classification of Adhesive and Sealant Materials*, in *Handbook of Adhesion Technology*, L.F.M. da Silva, A. Öchsner, and R.D. Adams, Editors. 2011, Springer: Berlim, Alemanha. p. 261.
16. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. FEUP: Porto.
17. Ebnesajjad, S. and A.H. Landrock, *Adhesives technology handbook*. 2014, Amestredão, Países Baixos: Elsevier.
18. ASTM, D., *Standard practice for classifying failure modes in fiber-reinforced-plastic (FRP) joints*. 2002, ASTM: Pensilvania, E. U. A.
19. Da Silva, L.F., A. Öchsner, and R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011, Berlim, Amestredão: Springer Science & Business Media.
20. Yarusso, D., *Adhesion Science and Engineering*, in *The Mechanics of Adhesion*, D.A. Dillard and A.V. Pocius, Editors. 2002, Elsevier, Amsterdam: Amestredão, Países Baixos.
21. Volkersen, O., *Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten*. Luftfahrtforschung, 1938. **15**: p. 41-47.
22. Goland, M., *The stresses in cemented joints*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1944. **17**: p. 66.
23. Hart-Smith, L.J., *Adhesive-bonded single-lap joints*. 1973, Washington D.C. EUA: National Aeronautics and Space Administration.
24. Wah, T., *Stress distribution in a bonded anisotropic lap joint*. Journal of Engineering Materials and Technologies, 1973.
25. Renton, W.J. and J.R. Vinson, *The efficient design of adhesive bonded joints*. The Journal of Adhesion, 1975. **7**(3): p. 175-193.
26. Griffith, A.A., *The phenomena of rupture and flow in solids*. Philosophical transactions of the royal society of london. Series A, containing papers of a mathematical or physical character VI, 1921. **221**(582-593): p. 163-198.
27. Williams, M., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bulletin of the seismological society of America, 1959. **49**(2): p. 199-204.
28. Hutchinson, J., *Plastic stress and strain fields at a crack tip*. Journal of the Mechanics Physics of Solids, 1968. **16**(5): p. 337-342.
29. Rice, J.R., *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. Journal of Applied Mechanics, 1968.
30. Barenblatt, G.I., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks*. Journal of Applied Mathematics Mechanics of Materials, 1959. **23**(3): p. 622-636.
31. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.
32. Duan, K., X. Hu, and Y.-W. Mai, *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. Journal of Adhesion Science Technology, 2004. **18**(1): p. 39-53.
33. Ji, G., et al., *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids Structures, 2010. **47**(18-19): p. 2445-2458.

34. Kafkalidis, M.S. and M.D. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids Structures, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
35. Turon, A., et al., *Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue*. Composites Part A: applied science manufacturing, 2007. **38**(11): p. 2270-2282.
36. Yang, Q.D. and M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. **110**(2): p. 175-187.
37. Alfano, G. and M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International journal for numerical methods in engineering, 2001. **50**(7): p. 1701-1736.
38. Chandra, N., et al., *Some issues in the application of cohesive zone models for metal–ceramic interfaces*. International Journal of Solids Structures, 2002. **39**(10): p. 2827-2855.
39. Chen, J., *Predicting progressive delamination of stiffened fibre-composite panel and repaired sandwich panel by decohesion models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002. **15**(5): p. 429-442.
40. Liljedahl, C.D.M., et al., *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
41. De Moura, M.F.S.F., et al., *Prediction of compressive strength of carbon–epoxy laminates containing delamination by using a mixed-mode damage model*. Composite Structures, 2000. **50**(2): p. 151-157.
42. De Moura, M.F.S., R.D.S.G.-. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. Composites Science Technology, 2008. **68**(10-11): p. 2224-2230.
43. De Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints*. International Journal of Solids Structures, 2009. **46**(6): p. 1589-1595.
44. Carlberger, T. and U. Stigh, *Influence of layer thickness on cohesive properties of an epoxy-based adhesive—an experimental study*. The Journal of adhesion, 2010. **86**(8): p. 816-835.
45. Lee, M.J., et al., *Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model*. International Journal of Adhesion Adhesives, 2010. **30**(5): p. 322-328.
46. Stigh, U., et al., *Some aspects of cohesive models and modelling with special application to strength of adhesive layers*. International Journal of Fracture, 2010. **165**(2): p. 149-162.
47. Gustafson, P.A. and A.M. Waas, *The influence of adhesive constitutive parameters in cohesive zone finite element models of adhesively bonded joints*. International Journal of Solids Structures, 2009. **46**(10): p. 2201-2215.
48. Standard, A., *Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*. 2012, ASTM International Pensilvania, EUA.
49. Yoshihara, H., *Mode II R-curve of wood measured by 4-ENF test*. Engineering Fracture Mechanics, 2004. **71**(13-14): p. 2065-2077.

50. Blackman, B.R.K., A.J. Brunner, and J.G. Williams, *Mode II fracture testing of composites: a new look at an old problem*. Engineering fracture mechanics, 2006. **73**(16): p. 2443-2455.
51. Campilho, R.D.S.G., et al., *Fracture toughness determination of adhesive and co-cured joints in natural fibre composites*. Composites Part B: Engineering, 2013. **50**: p. 120-126.
52. Zhu, Y., K.M. Liechti, and K. Ravi-Chandar, *Direct extraction of rate-dependent traction–separation laws for polyurea/steel interfaces*. International Journal of Solids Structures, 2009. **46**(1): p. 31-51.
53. Pardoen, T., et al., *Constraint effects in adhesive joint fracture*. Journal of the Mechanics Physics of Solids, 2005. **53**(9): p. 1951-1983.
54. Flinn, B.D., et al., *Fracture Resistance Characteristics of a Metal-Toughened Ceramic*. Journal of the American Ceramic Society, 1993. **76**(2): p. 369-375.
55. Mello, A.W. and K.M. Liechti, *The effect of self-assembled monolayers on interfacial fracture*. Journal of Applied Mechanics, 2006.
56. Li, S., et al., *Use of a cohesive-zone model to analyze the fracture of a fiber-reinforced polymer–matrix composite*. Composites Science Technology, 2005. **65**(3-4): p. 537-549.
57. Campilho, R.D.S.G., et al., *Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs*. Composites Part B: Engineering, 2009. **40**(2): p. 149-157.
58. Leffler, K., K.S. Alfredsson, and U. Stigh, *Shear behaviour of adhesive layers*. International Journal of Solids Structures, 2007. **44**(2): p. 530-545.
59. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. De Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
60. Andersson, T. and U. Stigh, *The stress–elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. International Journal of Solids Structures, 2004. **41**(2): p. 413-434.
61. Daudeville, L. and P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1-4): p. 547-555.
62. Khoramishad, H., et al., *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of Fatigue, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.
63. Kattan, P.I. and G.Z. Voyiadjis, *Damage mechanics with finite elements: practical applications with computer tools*. 2012, Berlim, Alemanha: Springer Science & Business Media.
64. Raghavan, P. and S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. Mechanics of materials, 2005. **37**(9): p. 955-979.
65. Wahab, M.M.A., et al., *Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics*. Journal of Adhesion Science Technology, 2001. **15**(7): p. 763-781.
66. Imanaka, M., et al., *Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive*. Journal of Adhesion Science Technology, 2003. **17**(7): p. 981-994.

67. Shenoy, V., et al., *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**(7): p. 1073-1090.
68. Hua, Y., et al., *Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive*. International Journal of Adhesion Adhesives, 2008. **28**(6): p. 302-313.
69. Chen, Z., R. Adams, and L.F. Da Silva, *Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion*. Engineering Fracture Mechanics, 2011. **78**(6): p. 990-1007.
70. Mohammadi, S., *Extended finite element method: for fracture analysis of structures*. 2008, Nova Jersey, EUA: John Wiley & Sons.
71. Belytschko, T. and T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International journal for numerical methods in engineering, 1999. **45**(5): p. 601-620.
72. Moës, N., J. Dolbow, and T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. International journal for numerical methods in engineering, 1999. **46**(1): p. 131-150.
73. Campilho, R.D.S.G., et al., *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
74. de Moura, M.F.d.S.F., A.M.B. de Moraes, and A.G. de Magalhães, *Materiais compósitos: materiais, fabrico e comportamento mecânico*. 2005, Porto, Portugal: Publindústria.
75. Jones, R.M., *Mechanics of composite materials*. 1998, Flórida, EUA: CRC press.
76. Shigley, J.E., L.D. Mitchell, and H. Saunders, *Mechanical Engineering Design*. 1985, Nova Iorque, EUA: McGraw-Hill.
77. Grover, M.P., *Fundamentals of modern manufacturing*. 1996, Nova Jersey, EUA: John Wiley & Sons.
78. Nijssen, R., *Composite Materials: An Introduction*. 2015, Amesterdão, Países Baixos: Inholland University of Applied Sciences.
79. Grote, K.-H. and E.K. Antonsson, *Springer handbook of mechanical engineering*. Vol. 10. 2009, Berlim, Alemanha: Springer Science & Business Media.
80. Vasiliev, V.V. and E.V. Morozov, *Mechanics and analysis of composite materials*. 2001, Amesterdão, Países Baixos: Elsevier.
81. Toray, *T800s Intermediate modulu, T.c. materials*, Toray, Editor. 2018.
82. Toray, *M40J carbon fiber T.c. materials*, Toray, Editor. 2018.
83. Kelly, A. and C.H. Zweben, *Comprehensive composite materials*. 2000, Amesterdão, Países Baixos: Elsevier.
84. Mouritz, A., *Fibre-polymer composites for aerospace structures and engines*. Introduction to Aerospace Materials, 1st ed. 2012, Cambridge, Reino Unido: Woodhead Publishing. 338-393.
85. Friedrich, K. and A.A. Almajid, *Manufacturing aspects of advanced polymer composites for automotive applications*. Applied Composite Materials, 2013. **20**(2): p. 107-128.

86. Sapuan, S.M., *Composite materials: Concurrent engineering approach*. 2017, Oxford, Reino Unido: Butterworth-Heinemann.
87. Frizelle, W.G., *Injection molding technology*, in *Applied Plastics Engineering Handbook*, M. Kutz, Editor. 2011, Elsevier: Amesterdão, Países Baixos. p. 205-214.
88. Kandelbauer, A., et al., *Unsaturated polyesters and vinyl esters*. Handbook of thermoset plastics. 2014, Amesterdão, Países Baixos: Elsevier. 111-172.
89. Balasubramanian, K., M.T. Sultan, and N. Rajeswari, *Manufacturing techniques of composites for aerospace applications*, in *Sustainable Composites for Aerospace Applications*, Mohammad J. and M. T., Editors. 2018, Elsevier: Amesterdão, Países Baixos. p. 55-67.
90. Zubayar, A., *Mechanical property characterization of polymeric composites reinforced by continuous microfibers*. 2016, South Dakota State University: Dakota do Sul, EUA.
91. Gallegos, C., Marco, F., *Theoretical and Experimental Performance Analysis of a Cellular GFRP Vehicular Bridge Deck*. 2016, Instituto de Ciências da Construção Eduardo Torroja.
92. Swift, K.G. and J.D. Booker, *Manufacturing process selection handbook*. 2013, Oxford, Reino Unido: Butterworth-Heinemann.
93. Dai, D. and M. Fan, *Wood fibres as reinforcements in natural fibre composites: structure, properties, processing and applications*, in *Natural Fibre Composites*, A. Hodzic and R. Shanks, Editors. 2014, Elsevier: Amesterdão, Países Baixos. p. 3-65.
94. Halley, P.J., *Rheology of thermosets: the use of chemorheology to characterise and model thermoset flow behaviour*, in *Thermosets Structure, Properties and Applications*, G. Quipeng, Editor. 2012, Elsevier: Amesterdão, Países Baixos. p. 92-117.
95. Asada, S., et al., *Prepreg and process for producing the same*, in *Google Patents*. 1992, Mitsubishi Rayon Co Ltd: Japão.
96. Philipp, T.R., T. Winkler, and G. Reinhart, *Enhanced Production Control for Prepreg Manufacturing*. Procedia CIRP, 2013. **7**: p. 467-472.
97. Callister, W.D. and D.G. Rethwisch, *Materials science and engineering*. Vol. 5. 2011, Nova Iorque, EUA: John Wiley & Sons.
98. Sadigh, M.A.S. and G. Marami, *Enhancing fatigue life in adhesively bonded joints using reduced graphene oxide additive: Experimental and numerical evaluation*. International journal of Adhesion Adhesives, 2018. **84**: p. 283-290.
99. Sun, Z., X. Hu, and H. Chen, *Effects of aramid-fibre toughening on interfacial fracture toughness of epoxy adhesive joint between carbon-fibre face sheet and aluminium substrate*. International Journal of Adhesion Adhesives, 2014. **48**: p. 288-294.
100. Kinloch, A., et al., *The effect of silica nano particles and rubber particles on the toughness of multiphase thermosetting epoxy polymers*. Journal of Materials Science, 2005.
101. Jung, W.-K., S.-H. Ahn, and M.-S. Won, *Effect of nanoparticles and ion implantation on the electromagnetic shielding of glass-epoxy composites*. Journal of Composite Materials, 2006. **40**(2): p. 175-188.

102. Razavi, S.M.J., E.S. Bale, and F. Berto, *Mechanical behavior of metallic fiber-reinforced adhesive under cyclic loading*. Procedia Structural Integrity, 2020. **26**: p. 225-228.
103. Rosso, P., et al., *A toughened epoxy resin by silica nanoparticle reinforcement*. Journal of Applied Polymer Science, 2006. **100**(3): p. 1849-1855.
104. Kowalczyk, A., et al., *Influence of a wollastonite microfiller and a halloysite nanofiller on properties of thermally curable pressure-sensitive structural adhesives*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2019. **95**: p. 102397.
105. Majid, M.S.A., M.J.M. Ridzuan, and K.H. Lim, *Effect of nanoclay filler on mechanical and morphological properties of Napier/epoxy composites*, in *Interfaces in Particle and Fibre Reinforced Composites*, T. Sabu, et al., Editors. 2020, Elsevier: Amesterdão, Países Baixos. p. 137-162.
106. Delzendehrooy, F., et al., *Strength improvement of adhesively bonded single lap joints with date palm fibers: Effect of type, size, treatment method and density of fibers*. Composites Part B: Engineering, 2020. **188**: p. 107874.
107. Fernandes, R., et al., *Mode I fracture characterization of a hybrid cork and carbon-epoxy laminate*. Composite Structures, 2014. **112**: p. 248-253.
108. Santhosh, J., et al., *Study of properties of banana fiber reinforced composites*. Int. J. Res. Eng. Technol, 2014. **3**(11): p. 144-150.
109. Gopinath, P. and P. Suresh, *Effect of Jute Reinforcement Parameters on Mechanical Properties of Composite Structures*. Journal of Testing Evaluation, 2018. **47**(4): p. 2585-2595.
110. Barbosa, A.Q., et al., *Utilização de micro partículas de cortiça como material de reforço em adesivos estruturais frágeis*. Ciência Tecnologia dos Materiais, 2013. **25**: p. 42-49.
111. Kanakannavar, S., et al., *Improved Delamination Behaviour in Glass-Cotton Reinforced Hybrid Composites*. Materials Today: Proceedings, 2018. **5**(11, Part 3): p. 24984-24996.
112. Silva, L.J., et al., *Statistical design of polymeric composites reinforced with banana fibres and silica microparticles*. Journal of Composite Materials, 2013. **47**(10): p. 1199-1210.
113. Li, G., et al., *Investigation of prepreg bonded composite single lap joint*. Composites Part B: Engineering, 2001. **32**(8): p. 651-658.
114. Bhatia, G.S., et al., *The role of patch-parent configurations on the tensile response of patch repaired carbon/epoxy laminates*. Polymer Testing, 2018. **70**: p. 413-425.
115. Brugo, T.M., et al., *Development and fracture toughness characterization of a nylon nanomat epoxy adhesive reinforcement*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design Applications, 2019. **233**(3): p. 465-474.
116. Shang, X., et al., *A strategy to reduce delamination of adhesive joints with composite substrates*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design Applications, 2019. **233**(3): p. 521-530.
117. Boyd, S.E., et al., *Enhanced delamination resistance of thick-section glass-epoxy composite laminates using compliant thermoplastic polyurethane interlayers*. Composite Structures, 2018. **189**: p. 184-191.

118. Kowalczyk, A., K. Kowalczyk, and M. Weisbrodt, *Influence of a phosphorus-based methacrylate monomer on features of thermally curable self-adhesive structural tapes*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018. **85**: p. 286-292.
119. Barus, M., et al., *Boron nitride inclusions within adhesive joints: Optimization of mechanical strength and bonded defects detection*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020. **98**: p. 102531.
120. Campilho, R.D.S.G., et al., *Strength prediction of single-and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.
121. ASTM, D., *Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials*. 2008, West Conshohocken, PA.
122. Fadhil, B., *Effect of Plies Stacking Sequence and Tube Geometry on the Crush Behavior of Tube under Low Velocity Impact –Numerical Study*. International Journal of Mechanics and Applications, 2013. **3**: p. 44-51.
123. Pinto, A.M.G., et al., *Single-lap joints of similar and dissimilar adherends bonded with an acrylic adhesive*. The Journal of Adhesion, 2009. **85**(6): p. 351-376.
124. Allix, O. and A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture, 1996. **77**(2): p. 111-140.
125. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. De Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science Technology, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.
126. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. De Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. International Journal of Adhesion Adhesives, 2009. **29**(2): p. 195-205.
127. Campilho, R.D.S.G., *Modelação da execução de reparações em materiais compósitos*, in *Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial 2005*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto, Portugal.
128. Finch, C.A., *Adhesion and adhesives technology—an introduction*, in *Polymer International*, A.V. Pocius, C. Hanser, and G. Verlag, Editors. 2004, Hanser: Ohio, EUA. p. 1394-1394.
129. Högberg, J.L. and U. Stigh, *Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(16): p. 2541-2556.
130. Campilho, R.D.S.G., et al., *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. Journal of Adhesion Science Technology, 2011. **25**(18): p. 2351-2368.
131. Luo, Q. and L. Tong, *Fully-coupled nonlinear analysis of single lap adhesive joints*. International Journal of Solids Structures, 2007. **44**(7-8): p. 2349-2370.
132. Adams, R.D., J. Comyn, and W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 1997, Berlim, Alemanha: Springer Science & Business Media.
133. Grant, L.D.R., R.D. Adams, and L.F.M. da Silva, *Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry*. International Journal of Adhesion Adhesives, 2009. **29**(4): p. 405-413.
134. Radice, J. and J. Vinson, *On the use of quasi-dynamic modeling for composite material structures: analysis of adhesively bonded joints with midplane*


- asymmetry and transverse shear deformation*. Composites Science Technology, 2006. **66**(14): p. 2528-2547.
135. Taib, A.A., et al., *Bonded joints with composite adherends. Part II. Finite element analysis of joggle lap joints*. International Journal of Adhesion Adhesives, 2006. **26**(4): p. 237-248.

ANEXOS




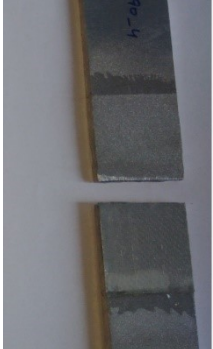
6 ANEXOS





6.1 ANEXO1





Junta	Provete	Tipode rotura	Força máxima (N)	Imagem
	1	Adesivo	1136,40	
	2	Adesivo	2198,78	
Aluminio/CFRP_00	3	Adesivo	1225,74	
	4	Adesivo	2082,90	

Junta	Provete	Tipode rotura	Força máxima (N)	Imagem
Aluminio/CFRP_90	1	Adesivo	1526,71	
	2	Adesivo	3336,59	
	3	Adesivo	3159,70	
	4	Adesivo	2804,79	

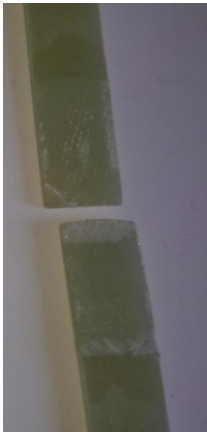
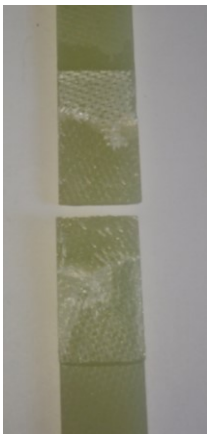

Junta	Provete	Tipode rotura	Força máxima (N)	Imagem
Aluminio/CFRP_+/- 45	1	Adesivo	1216,46	
	2	Interlaminar	687,14	
	3	Adesivo	369,02	
	4	Adesivo	0,4	

Junta	Provete	Tipode rotura	Força máxima (N)	Imagem
Aluminio /GFRP_00/90	1	Interlaminar	3905,76	
	2	Adesivo	4514,79	
	3	Adesivo	3885,84	
	4	Adesivo	3947,15	

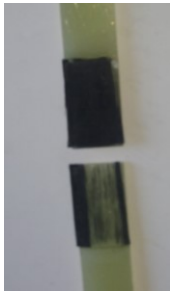
Junta	Provete	Tipode rotura	Força máxima (N)	Imagem
Aluminio/GFRP_+/- 45	1	Adesivo	4373,39	
	2	Adesivo	4403,66	
	3	Interlaminar	4626,27	
	4	Adesivo	4753,91	

Junta	Provete	Tipode rotura	Força máxima (N)	Imagem
CFRP/CFRP_90	1	Coesivo	3461,57	
	2	Coesivo	3691,67	
	3	Coesivo	3979,97	
	4	Coesivo	2979,88	

Junta	Provete	Tipode rotura	Força máxima (N)	Imagem
CFRP/GFRP_+/- 45	1	Coesivo	8448,54	
	2	Coesivo	5681,66	
	3	Coesivo	5317,10	

Junta	Provete	Tipode rotura	Força máxima (N)	Imagem
GFRP/GFRP_+/- 45	1	Coesivo	3646,14	
	2	Coesivo	4923,73	
	3	Coesivo	4400,76	

Junta	Provete	Tipode rotura	Força máxima (N)	Imagem
GFRP/CFRP_90	1	Coesivo	1368,16	
	2	Coesivo	2216,67	
	3	Coesivo	2657,59	

Junta	Provete	Tipode rotura	Força máxima (N)	Imagem
GFRP/CFRP_00	1	Coesivo	3102,37	
	2	Substrato	3799,03	
	3	Coesivo	2214,64	